

WO02054459

**Title:**

**PROJECTION OPTICAL SYSTEM AND PRODUCTION METHOD THEREFOR,  
EXPOSURE SYSTEM AND PRODUCTION METHOD THEREFOR, AND  
PRODUCTION METHOD FOR MICRODEVICE**

**Abstract:**

A production method for a projection optical system, capable of efficiently producing a projection optical system having very excellent optical characteristics sufficiently restricted in residual aberration, the method comprising a process of assembling a projection optical system, a process of measuring wave front aberration, a process of calculating respective components of wave front aberration with the measurement result allowed to correspond to zernike function, and first and second adjusting processes for adjusting optical members in the projection optical system according to respective components of wave front aberration obtained in the wave front component calculating process. Prior to the second adjusting process, a performance prediction process for predicting a performance after adjusted in the second adjusting process and a judging process for making judgement based on the performance predicted in the performance prediction process are implemented.

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2002年7月11日 (11.07.2002)

PCT

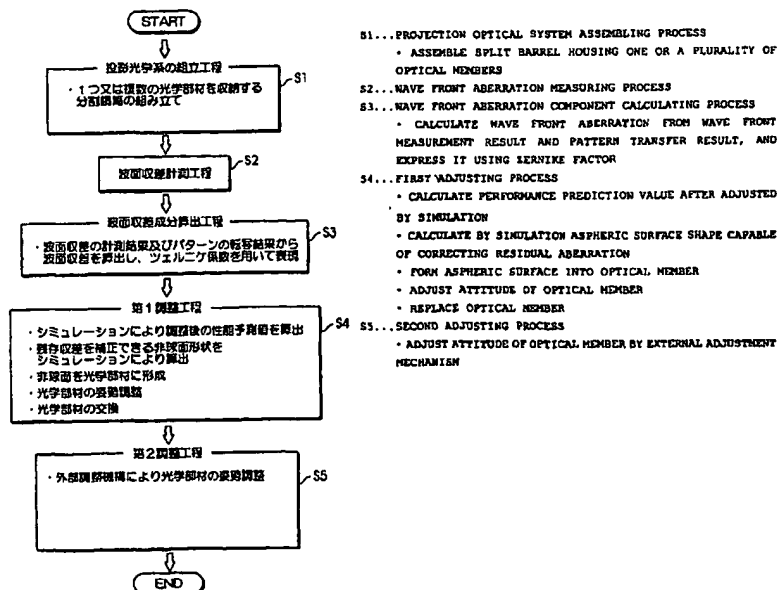
(10) 国際公開番号  
WO 02/054459 A1

- (51) 国際特許分類<sup>7</sup>: H01L 21/027, 田区丸の内3丁目2番3号株式会社ニコン内 Tokyo (JP)  
G03F 7/20, G02B 13/24, 13/18
- (21) 国際出願番号: PCT/JP01/11363
- (22) 国際出願日: 2001年12月25日 (25.12.2001)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2000-403308 2000年12月28日 (28.12.2000) JP  
特願 2001-55754 2001年2月28日 (28.02.2001) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 松山 知行 (MAT-SUYAMA, Tomoyuki) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代
- (74) 代理人: 志賀 正武, 外 (SHIGA, Masatake et al.); 〒169-8925 東京都新宿区高田馬場三丁目2番3号 ORビル Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ユーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: PROJECTION OPTICAL SYSTEM AND PRODUCTION METHOD THEREFOR, EXPOSURE SYSTEM AND PRODUCTION METHOD THEREFOR, AND PRODUCTION METHOD FOR MICRODEVICE

(54) 発明の名称: 投影光学系及びその製造方法、露光装置及びその製造方法、並びにマイクロデバイスの製造方法



(57) Abstract: A production method for a projection optical system, capable of efficiently producing a projection optical system having very excellent optical characteristics sufficiently restricted in residual aberration, the method comprising a process of assembling a projection optical system,

[続葉有]



添付公開書類:  
— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

a process of measuring wave front aberration, a process of calculating respective components of wave front aberration with the measurement result allowed to correspond to zernike function, and first and second adjusting processes for adjusting optical members in the projection optical system according to respective components of wave front aberration obtained in the wave front component calculating process. Prior to the second adjusting process, a performance prediction process for predicting a performance after adjusted in the second adjusting process and a judging process for making judgement based on the performance predicted in the performance prediction process are implemented.

(57) 要約:

本発明は、例えば、残収差が良好に抑えられ、極めて優れた光学特性を有する投影光学系を効率よく製造することができる投影光学系の製造方法を提供する。本発明に係る投影光学系の製造方法は、投影光学系を組み立てる組立工程と、波面収差を計測する波面収差計測工程と、計測結果をツェルニケ関数に対応させて波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程と、波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて投影光学系中の光学部材を調整する第1及び第2の調整工程とを有する。第2の調整工程の前には、第2の調整工程において調整された後の性能を予測する性能予測工程と、性能予測工程で予測された性能に基づいて判断する判断工程が実行される。

## 明 細 書

投影光学系及びその製造方法、露光装置及びその製造方法、  
並びにマイクロデバイスの製造方法

## 背景技術

## 1. 発明の技術分野

本発明は、投影光学系及びその製造方法、露光装置及びその製造方法、並びにマイクロデバイスの製造方法に関し、特に、リソグラフィ工程においてマスクに形成されたパターンの像を基板に投影する際に用いて好適な投影光学系及びその製造方法、露光装置及びその製造方法、並びにマイクロデバイスの製造方法に関する。

## 2. 従来技術

半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、又は薄膜磁気ヘッド等のマイクロデバイスの製造においては、マスクやレチクル（以下、マスクと称する）に形成されたパターンの像をフォトリソグロフ等の感光剤が塗布されたウェハやガラスプレート等（以下、これらを総称する場合は、基板と称する）に転写する露光装置が用いられる。露光装置は、例えば極めて微細なパターンが形成される半導体素子等を製造する場合に多用されるステッパー等の一括露光型の投影露光装置と、例えば大面積の液晶表示素子を製造する場合に多用されるステップ・アンド・スキャン方式等の走査露光型の投影露光装置とに大別される。通常、これらの露光装置は、いずれも、マスクのパターン像を基板に転写するための投影光学系を備える。

通常、マイクロデバイスは複数のパターンを層状に形成して製造されるため、露光装置を用いてマイクロデバイスを製造する際には、投影されるマスクのパターン像と、基板上に既に形成されているパターンとの正確な位置合わせを行った上で、マスクのパターン像を、高解像度で忠実に基板上へ投影しなければならない。従って、投影光学系には、収差が良好に抑えられ、高い解像度を有する、極めて優れた光学性能が要求される。露光装置に設けられる投影光学系は、かかる優れた光学性能を有するように設計されるが、レンズ等の光学部材自身の製造誤

差、又は投影光学系を製造する際に複数の光学部材を組み込んだ段階で生ずる組立て製造誤差等に起因する誤差が残存していると、この残存誤差に起因する収差の発生等により設計通りの光学性能を発揮することができない。従って、投影光学系は、設計通りの光学特性を発揮するように、レンズ等の光学部材の間隔調整等の種々の調整が行われつつ製造される。

本発明の出願人から、露光装置に設けられる優れた結像特性を有する投影光学系の製造方法が種々案出されている。

例えば、本発明の出願人が特開平 10-154657 号公報に開示した投影光学系の製造方法の概略は、以下の通りである。まず、投影光学系に設けられるレンズ等の光学部材の面形状を測定した後、光学部材を組み上げて投影光学系を得る。次に、投影光学系に残存する低次収差を計測し、この計測結果に基づいて投影光学系を調整する。その後、投影光学系に残存する高次収差を計測し、この高次収差を補正するために投影光学系のある光学部材に非球面を形成している。

また、本発明の出願人が特開 2000-249917 号公報（及びこれに対応する 2000 年 10 月 19 日付けで米国に出願された米国特許出願 691194 号）で提案した投影光学系の製造方法は、投影光学系に設けられる光学部材に屈折率の不均一性がある場合であっても、良好な光学特性を有する投影光学系を製造することができる製造方法で、その概略は以下の通りである。まず、レンズ等の光学部材の面形状及び屈折率分布等の光学特性を測定した後、光学部材を組み上げて投影光学系を得る。次に、投影光学系に設けられた光学部材の屈折率の不均一性を考慮した場合の投影光学系に残存する収差と、屈折率の不均一性を考慮しない場合の投影光学系に残存する収差をシミュレーションにより算出し、屈折率の不均一性に起因する残収差を補正しうる非球面を投影光学系の光学部材に形成することにより、光学部材の屈折率不均一性に起因する残収差を補正している。

ところで、近年、基板に形成されるパターンの微細化の要求が高まっている。その理由は、半導体素子を製造する場合を例に挙げると、パターンを微細化することにより、1 枚の基板から製造される半導体素子の数が増加するため、半導体素子の製造コストを下げることも、半導体素子そのものを小型化

することができるからであり、また、微細化することにより動作周波数を向上させることができ、更に低消費電力化を図ることもできるからである。現在のCPU（中央処理装置）は、 $0.18\mu\text{m}$ 程度のプロセスルールで製造されているが、今後 $0.1\sim 0.13\mu\text{m}$ 程度のプロセスルールでの製造が行われつつあり、将来的には更に微細なプロセスルールで製造されるものと予想される

微細なパターンを形成するには、露光時にマスクを照明する照明光を短波長化するとともに、投影光学系の開口数（N.A.）を高く設定する必要がある。投影光学系の開口数を高く設定すると、収差が良好に抑えられた投影光学系の設計が困難になる。近年、設計技術が進歩し、高い開口数を有していても、収差の発生が少ない投影光学系の設計が、従来と比較すると容易になっている。この優れた光学特性を発揮する投影光学系を製造する際には、投影光学系を高度に調整する必要がある。しかしながら、パターンの微細化に伴い、投影光学系の調整には更なる高精度が要求されているため、上述した従来の投影光学系の製造方法では、設計通りの光学特性を有する投影光学系を製造するのは困難である。従来の方法を用いて設計通りの光学性能を有する投影光学系を製造するのは不可能ではないが、調整が煩雑になり製造時間が長くなって、製造効率が低くなるものと考えられる。

本発明は上記事情に鑑みてなされたものであり、残収差が良好に抑えられ、極めて優れた光学特性を有する投影光学系を効率よく製造することができる投影光学系の製造方法及び極めて優れた光学特性を有する投影光学系、この投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系を備える露光装置及びその製造方法、並びにこの露光装置を用いたマイクロデバイスの製造方法を提供することを目的とする。

### 発明の開示

上記課題を解決するために、本発明の第1の観点による投影光学系の製造方法は、第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法において、1つ又は複数の光学部材（2、2a～2e）がそれぞれ収納された複数の鏡筒（30a～30e）を組み立てて投影光学系（PL）を得る組立工程（S1）と、組み立

てられた前記投影光学系（PL）の波面収差を計測する波面収差計測工程（S2）と、前記波面収差計測工程（S2）で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程（S3）と、前記波面収差成分算出工程（S3）で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒（30a～30e）を調整する調整工程（S4、S5）とを有することを特徴としている。

この発明では、高い光学性能が要求される投影光学系を製造するにあたり、組み立てられた投影光学系の波面収差を計測し、計測された波面収差を所定の関数に対応させて関数を成分分解して波面収差の各成分を算出し、算出された波面収差の各成分に応じて投影光学系が有する鏡筒を調整している。よって、投影光学系に残存する僅かな収差でも波面収差の各成分で容易に表現することができ、残存する僅かな収差を把握して鏡筒単位で調整することができるため、投影光学系の残収差を良好に且つ効率的に抑えることができる。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法は、第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法であって、複数の光学部材（2、2a～2e）を組み立てて投影光学系を得る組立工程（S1、S10、S12）と、前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測工程（S14、S30）と、前記波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程（S3、S34）と、前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の光学部材を調整する第1及び第2の調整工程（S4、S5、S36～S50、S52～S62）と、前記第2の調整工程（S5、S52～S62）の前に実行されて、前記第2の調整工程において調整された後の性能を予測する性能予測工程（S36）と、前記性能予測工程と前記第2の調整工程との間に実行されて、前記投影光学系の性能を、前記性能予測工程で予測された性能に基づいて判断する判断工程（S38）とを有することを特徴としている。

この発明では、高い光学性能が要求される投影光学系を製造するにあたり、組み立てられた投影光学系の波面収差を計測し、計測された波面収差を所定の関数に対応させて成分分解して波面収差の各成分を算出し、算出された波面収差を調

整する際に少なくとも二段階の調整を行っている。このとき、後の調整において調整され後の投影光学系の性能を予測し、予測された性能に基づいて先の調整を終了するか否かを判断しているため、後の調整での調整作業が容易となり、残存収差が良好に抑えられて極めて優れた光学特性を有する投影光学系を効率良く製造することができる。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記波面収差計測工程が、前記第1の調整工程の前に実行される第1の波面収差計測工程と、前記第1の調整工程と前記判断工程との間に実行される第2の波面収差計測工程とを含み、前記波面収差成分算出工程は、前記第1の波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させる第1の波面収差成分算出工程と、前記第2の波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させる第2の波面収差成分算出工程とを含むことが望ましい。

この発明によれば、第1及び第2の調整工程の双方、特に第2の調整工程において、波面収差計測及び波面収差成分算出を行っているため、高性能な投影光学系を効率良く製造できる。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第1調整工程が、前記光学部材（2、2a～2e）を調整した後に残存する残存波面収差を補正できる非球面形状を算出する非球面形状算出工程（S46）を含むことが望ましい。

この発明によれば、光学部材を調整した後に残存する残存波面収差を補正できる非球面形状を計算により求めているので、実際に光学部材に非球面を形成して試行錯誤しながら残存波面収差を補正する場合に比べて製造効率を向上させることができる。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記非球面形状算出工程にて、前記投影光学系の光軸に対して非回転対称成分を含む非球面を算出することが望ましい。

この発明によれば、残存波面収差を補正できる非球面形状を計算により求める際に、投影光学系の光軸に対して非回転対称成分を含む非球面を求めているので、幾何光学のザイデルの五収差等の低次の収差のみならず、高次の収差も効率よく



補正することができる。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記非球面形状算出工程（S50）で算出された非球面を、前記複数の光学部材（2、2a～2e）のうちの少なくとも1つの所定の光学部材（2、2a～2e）の光学面に形成する非球面形成工程（S50）を更に備えることが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記非球面形状算出工程にて、前記複数の光学部材のうちの少なくとも2つの光学部材の光学面に関して前記非球面形状を算出し、物体面上の所定の一点からの光束が前記光学面を通過する際の光束の径を部分光束径とすると、前記少なくとも2つの光学部材に、前記光学面の有効径に対する前記部分光束径が異なるものが選択されることが望ましい。

この発明によれば、光学部材の有効径と通過する光束径との比が異なる少なくとも2つの光学部材に非球面が形成されるため、特定の収差のみを効果的に補正する上で好適である。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第1調整工程にて、少なくとも前記光学部材（2、2a～2e）の姿勢を調整し、また、前記複数の光学部材（2、2a～2e）のうちの少なくとも1つの光学部材（2、2a～2e）の交換を行うことが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記判断工程（S38）において前記投影光学系が所定の性能を有していない場合には、前記非球面形状算出工程へ移行する判断を前記判断工程で行うことが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第2調整工程にて、前記投影光学系（PL）の外部から前記投影光学系（PL）の性能を調整することができる外部調整機構（8、32a～32e、35）を用いることが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第2調整工程が、前記外部調整機構による調整量と前記投影光学系（PL）の性能の変化量との相関を求める工程（S52）を有することが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第2調整工

程が、前記光学部材（2、2 a～2 e）の姿勢を調整する補助工程（S 6 2）と、前記複数の光学部材（2、2 a～2 e）のうちの前記第1面及び／又は前記第2面近傍の光学部材（2、2 a～2 e）の交換を行う補助工程（S 6 2）との少なくとも何れか一方を有することが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第2調整工程にて、前記投影光学系（P L）の波長を設定することが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記第2調整工程が、前記第2面の姿勢を微調整する工程を含むことが望ましい。

また、本発明の第2の観点による投影光学系の製造方法では、前記組立工程にて、1つ又は複数の前記光学部材（2、2 a～2 e）がそれぞれ収納された複数の鏡筒（3 0 a～3 0 e）を組み立て、前記調整工程にて、前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒（3 0 a～3 0 e）を調整することが望ましい。

また、本発明の第3の観点による投影光学系の製造方法は、第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法であって、複数の光学部材（2、2 a～2 e）を組み立てて投影光学系（P L）を得る組立工程（S 1 0、S 1 2）と、組み立てられた前記投影光学系（P L）の波面収差を計測する波面収差計測工程（S 3 0）と、前記第2工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程（S 3 4）と、前記第3工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の光学部材を調整する調整工程（S 4 0～S 6 2）とを備え、前記調整工程が、前記光学部材を調整した後に残存する残存波面収差を補正できる非球面形状を算出する非球面形状算出補助工程（S 4 6）を備え、前記非球面形状算出補助工程にて、前記複数の光学部材のうちの少なくとも2つの光学部材（2、2 a～2 e）の光学面に関して前記非球面形状を算出し、物体（R）面上の所定の一点（Q 1又はQ 2）からの光束が前記光学面を通過する際の光束の径を部分光束径とするとき、前記少なくとも2つの光学部材に、前記光学面の有効径に対する前記部分光束径が異なるものが選択されることを特徴としている。

また、本発明の第4の観点による投影光学系の製造方法は、第1面の像を第2

面上に結像させる投影光学系の製造方法において、複数の光学部材（2、2 a～2 1）を組み立てて投影光学系（P L）を得る組立工程（S 1 0、S 1 2）と、前記光学部材（2、2 a～2 1）の内の特定の光学部材（2 b、2 d、2 e、2 f、2 g）を外部から調整する外部調整機構（3 2、3 8、3 9）を前記投影光学系（P L）に取り付ける取付工程（S 5 2）と、前記投影光学系（P L）の波面収差を計測する波面収差計測工程（S 5 4）と、前記波面収差計測工程（S 5 4）で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程（S 5 8）と、前記波面収差成分算出工程（S 5 8）で得られた波面収差の各成分に応じて前記外部調整機構（3 2、3 8、3 9）により前記投影光学系（P L）の性能を微調整する微調工程（S 6 2）とを有することを特徴としている。

また、本発明の第4の観点による投影光学系の製造方法は、前記外部調整機構（3 2、3 8、3 9）が、前記特定の光学部材（2 b、2 d、2 e、2 f、2 g）の1つ又は複数の調整して少なくとも3つ以上の収差を独立に調整することを特徴としている。

また、上記課題を解決するために、本発明の露光装置の製造方法は、上記投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系（P L）を準備する工程と、前記投影光学系（P L）の前記第1面にマスク（R）を位置決めするためのマスクステージ（1 6）を準備する工程と、前記投影光学系（P L）の前記第2面に基板（W）を位置決めするための基板ステージ（1 8）を準備する工程とを有することを特徴としている。

また、上記課題を解決するために、本発明では、上記の製造方法によって製造された投影光学系を提供することを特徴としている。

また、上記課題を解決するために、本発明の露光装置は、上記投影光学系の製造方法により製造された投影光学系（P L）を備え、前記第1面に位置決めされたマスク（R）のパターン像を、前記投影光学系（P L）を介して前記第2面に位置決めされた基板（W）へ転写することを特徴としている。

また、上記課題を解決するために、本発明のマイクロデバイスの製造方法は、上記露光装置を用いて前記マスク（R）のパターン（D P）を前記基板（W）上

に露光する露光工程（S 9 6）と、前記露光工程（S 9 6）により露光された前記基板を（W）現像する現像工程（S 9 7）とを含むことを特徴としている。

#### 図面の簡単な説明

図 1 は、本発明の一実施形態による投影光学系を備える本発明の一実施形態による露光装置の概略構成を示す図である。

図 2 A は、投影光学系の下端部に配置される調整装置の側方の断面構造を模式的に示す図である。

図 2 B は、図 2 A に示す調整装置の側面の構造を示す図である。

図 3 は、第 1 部材に保持されている平行平板の傾き角と偏心コマ収差の発生及び補正との関係を概念的に説明する図である。

図 4 は、本発明の一実施形態による投影光学系を製造する際に用いられる組立装置の構成を概略的に示す断面図である。

図 5 は、組立装置の荷重低減部を示す要部の断面図である。

図 6 は、組立装置の偏芯調整部を示す要部の断面図である。

図 7 は、位相回復法を用いた収差測定装置（収差測定装置）の概略構成を示す図である。

図 8 は、波面収差測定装置の概略構成を示す図である。

図 9 は、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の概略を示すフローチャートである。

図 10 は、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の詳細なフローを示すフローチャートである。

図 11 は、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の詳細なフローを示すフローチャートである。

図 12 は、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の詳細なフローを示すフローチャートである。

図 13 A は、センターアス成分を補正する原理を説明するための図である。

図 13 B は、センターアス成分を補正する原理を説明するための図である。

図 14 は、非球面が形成される光学部材を説明するための図である。

図 1 5 は、マイクロデバイスの製造工程の一例を示すフローチャートである。

図 1 6 は、半導体デバイスの場合における、図 1 5 のステップ S 8 3 の詳細なフローの一例を示す図である。

図 1 7 は、分割鏡筒内に組み込まれる光学部材の、製造から分割鏡筒に組み込まれるまでに行われる一連の工程の詳細を示すフローチャートである。

図 1 8 は、ブロック硝材の屈折率の絶対値及び屈折率分布を測定する干渉計装置の構成を示す図である。

図 1 9 A は、マイケルソン型干渉計を利用した中心厚測定装置の概略構成図である。

図 1 9 B は、受光素子に入射される干渉光の強度と反射ミラーの位置との関係を示す図である。

図 2 0 は、本発明の実施形態の変形例による投影光学系の概略構成を示す図である。

図 2 1 は、変形例による投影光学系の分割鏡筒のうちの一つを示す上面図である。

図 2 2 A は、2 種類の偏心ディストーションを説明するための図である。

図 2 2 B は、2 種類の偏心ディストーションを説明するための図である。

図 2 2 C は、2 種類の偏心ディストーションを説明するための図である。

### 発明を実施するための最良の形態

以下、図面を参照して本発明の一実施形態による投影光学系及びその製造方法、露光装置及びその製造方法、並びにマイクロデバイスの製造方法について詳細に説明する。

#### 〔露光装置〕

図 1 は、本発明の一実施形態による投影光学系を備える本発明の一実施形態による露光装置の概略構成を示す図である。本実施形態では、本発明を、図 1 に示したように、レチクル R に形成された回路パターン D P の投影光学系 P L を介した縮小像を、ウェハ W に設定された複数のショット領域のうち、所定のショット領域に転写するステップ・アンド・リピート方式の露光装置 1 0 に適用した場合

を例に挙げて説明する。尚、以下の説明においては、図1中に示したXYZ直交座標系を設定し、このXYZ直交座標系を参照しつつ各部材の位置関係について説明する。XYZ直交座標系は、X軸及びY軸がウェハステージ18に対して平行となるよう設定され、Z軸がウェハステージ18に対して直交する方向（投影光学系PLの光軸AXに平行な方向）に設定されている。図中のXYZ座標系は、実際にはXY平面が水平面に平行な面に設定され、Z軸が鉛直上方向に設定される。

図1に示した露光装置10は、主に光源12、照明光学系14、レチクルRのY平面内における位置決めを行うマスクステージとしてのレチクルステージ16、投影光学系PL、ウェハWを投影光学系PLの光軸AX（Z軸方向）と直交するXY平面内で移動させる基板ステージとしてのウェハステージ18、及び主制御系20から構成されている。尚、図1においては、説明の都合上、投影光学系PLについてはその断面構造を図示している。光源12は、例えばKrFエキシマレーザ（248nm）、ArFエキシマレーザ（193nm）等を備え、露光時に必要となる照明光ILを射出する。照明光学系14は、図示しないリレーレンズ、フライアイレンズやマイクロレンズアレイ、回折格子アレイ、内面反射型インテグレータ（ロッド型インテグレータ）等のオプティカルインテグレータ、インテグレータセンサ、スペックル低減装置、レチクルRの照明領域を規定するレチクルブラインド等で構成されており、光源12から射出された照明光ILの照度分布を均一化するとともに、照明光ILの断面形状を整形する。

照明光学系14の下方（-Z軸方向）に設置されたレチクルステージ16は、レチクルホルダ17を介してレチクルRを保持する。レチクルステージ16は、レチクルRを所定位置に位置付けるため、レチクルステージ制御装置22からの制御信号を受けてレチクルR面内（XY平面内）で移動可能に構成される。具体的には、レチクルRは、その回路パターンDPの中心点が投影光学系PLの光軸AX上に位置するように位置決めされる。均一な照度分布の照明光ILが照射されると、レチクルRに形成された回路パターンDPの像が、投影光学系PLを介してウェハW上に投影される。投影光学系PLには、温度、気圧等の環境変化に対応して結像特性等の光学特性を一定に制御する、レンズコントローラ部29が

設けられている。

投影光学系 P L は、後述するように、複数のレンズ素子 2 が鏡筒 3 0 内で共通の光軸 A X を有するように同軸上に配列された構造を有し、レチクル R の回路パターン D P が形成された面とウェハ W の表面とがそれらのレンズ素子 2 からなる光学系に関して共役になるように、レチクル R とウェハ W との間に配置されている。換言すると、レチクル R の回路パターン D P が形成された面は、投影光学系 P L の物体面（第 1 面）に位置決めされ、ウェハ W の表面は投影光学系 P L の像面（第 2 面）に位置決めされる。投影光学系 P L の縮小倍率は、レンズ素子 2 からなる光学系の倍率により決定される。また、鏡筒 3 0 の外周部上であって Z 軸方向の中央位置には、投影光学系 P L を露光装置 1 0 内の架台（図示しない）に装着させるためのフランジ 3 1 が形成されている。

ウェハ W は、ウェハホルダ 1 9 を介してウェハステージ 1 8 上に保持されている。ウェハステージ 1 8 は、図中 X 軸方向及び Y 軸方向にそれぞれ移動可能な一対のブロック（図示省略）を重ね合わせたもので、X Y 平面内での位置が調整自在になっている。また、図示は省略しているが、ウェハステージ 1 8 は、Z 軸方向にウェハ W を移動させる Z ステージ、ウェハ W を X Y 平面内で微小回転させるステージ、及び Z 軸に対する角度を変化させて X Y 平面に対するウェハ W の傾きを調整するステージ等から構成される。ウェハステージ 1 8 の上面の一端には、ウェハステージ 1 8 の移動可能範囲以上の長さを有する移動鏡 2 8 が取り付けられ、移動鏡 2 8 の鏡面に対向した位置にレーザ干渉計 2 6 が配置されている。

尚、図 1 では簡略化して図示しているが、移動鏡 2 8 は、X 軸に垂直な反射面を有する移動鏡及び Y 軸に垂直な反射面を有する移動鏡より構成されている。また、レーザ干渉計 2 6 は、X 軸に沿って移動鏡 2 8 にレーザビームを照射する 2 個の X 軸用のレーザ干渉計及び、Y 軸に沿って移動鏡 2 8 にレーザビームを照射する Y 軸用のレーザ干渉計により構成され、X 軸用の 1 個のレーザ干渉計及び Y 軸用の 1 個のレーザ干渉計により、ウェハステージ 1 8 の X 座標及び Y 座標が計測される。また、X 軸用の 2 個のレーザ干渉計の計測値の差により、ウェハステージ 1 8 の回転角が計測される。また、X 軸用の 2 個のレーザ干渉計の計測値の差により、ウェハステージ 1 8 の X Y 平面内における回転角が計測される。レー

ザ干渉計 26 により計測された X 座標、Y 座標、及び回転角の情報は、ステージ位置情報としてウェハステージ制御系 24 へ出力され、ウェハ W の姿勢をナノオーダーで制御する。

光源 12 から射出される照明光 IL の強度及び照射タイミングの制御、レチクルステージ 16 の微動制御、及びウェハステージ 18 の移動制御は、主制御系 20 により一括して管理される。上記構成により、レチクル R が照明光学系 14 により均一に照明されると、レチクル R に形成された回路パターン DP の像が投影光学系 PL の縮小倍率に応じて縮小され、ウェハ W 上のショット領域に転写される。一つのショット領域の露光処理が終了すると、次のショット領域が、投影光学系 PL を介してレチクル R のパターン面と共役な位置に位置するようにウェハステージ 18 を XY 面内においてステップ移動し、同様の露光動作を行う。

#### 〔投影光学系〕

以上、本発明の一実施形態による露光装置の概略構成及び動作について説明したが、次に、本発明の一実施形態による露光装置が備える本発明の一実施形態による投影光学系について説明する。図 1 に示したように、レンズ素子 2 は、それぞれ、その外周部分において環状のレンズ枠 4 により保持され、レンズ枠 4 は鏡筒 30 内で光軸 AX に沿って配列している。レンズ枠 4 により保持された各レンズ素子 2 の光軸は投影光学装置 PL の光軸 AX と同軸となるように配置されている。鏡筒 30 は分割鏡筒 30a ~ 30e を有し、各々の分割鏡筒 30a ~ 30e には 1 つ又は複数のレンズ素子 2 が収納されている。分割鏡筒 30a には、複数のレンズ素子 2a 及び開口絞り AS が設けられている。また、分割鏡筒 30b ~ 30e 各々にはレンズ要素 2b ~ 2e がそれぞれ設けられている。このように、分割鏡筒 30a ~ 30e には、レンズ要素 2a ~ 2e のみならず、開口絞り AS や収差を補正するための図示せぬ光学部材が 1 つ又は複数組み込まれている。尚、図 1 に示した鏡筒 30 は、5 つの分割鏡筒を有しているが、分割鏡筒の数は 5 つには限定されない。さらに、図 1 の鏡筒 30 では、鏡筒 30 を支持するためのフランジ 31 よりも下部の分割鏡筒が 1 つ (30a) であるが、この部分を複数の分割鏡筒で構成しても良い。

また、分割鏡筒 30a ~ 30e には、投影光学系 PL を組み立てた後で投影光



光学系 P L の鏡筒 3 0 の外部から残存する収差を調整するための外部調整機構として、調整部材 3 2 a ~ 3 2 e が設けられている。調整部材 3 0 a ~ 3 0 e によれば、図示せぬ光学部材の光軸 A X 方向の位置、光軸 A X に直交する面内における位置（偏心）、光軸 A X に直交する軸周りの回転位置、光軸 A X 周りの回転位置を含んだ姿勢を調整することが可能である。各調整部材 3 2 a ~ 3 2 e は、例えば投影光学系 P L の光軸 A X に直交する平面内において 1 2 0 度の角度で分割鏡筒 3 0 a ~ 3 0 d の側壁部に取り付けられた 3 つのアクチュエータやピエゾ素子等の可動部材を有し、この可動部材が伸縮することにより、上記の姿勢調整が可能となっている。また、調整部材 3 2 a ~ 3 2 e には、可動部材の伸縮量を計測する変位センサが設けられている。尚、調整部材 3 2 a ~ 3 2 e の姿勢はレンズコントローラ部 2 9 により制御される。

また、投影光学系 P L の下部には、投影光学系 P L の残収差を調整するための調整装置 3 4 が設けられている。調整装置 3 4 は、上述した投影光学系 P L に設けられた分割鏡筒 3 0 a と、ウェハ W との間に配置されて投影光学系 P L の鏡筒 3 0 で生じた球面収差を補正する平行平板 6 とを備える。この平行平板 6 は、投影光学系 P L の光軸 A X にほぼ垂直に配置されているが、平行板駆動装置 3 5 によって適宜移動可能となっている。この平行板駆動装置 3 5 は、レンズコントローラ部 2 9 の制御下で、平行平板 6 の光軸 A X に垂直な面（X Y 平面）に対する傾斜角を制御する。

平行板駆動装置 3 5 が、例えば、平行平板 6 を光軸 A X に垂直な面から僅かに傾けることにより、鏡筒 3 0 で生じた偏心コマ収差のみを独立して補正することができる。即ち、平行平板 6 の法線が光軸 A X となす傾き角と平行平板 6 のこのような傾きの方向との少なくとも一方を調整することによって、他の球面収差等から独立して投影光学系 P L の偏心コマ収差のみを独立して補正することができる。上述の外部調整機構 3 2 及び調整装置 3 4 による収差の補正に際しては、ウェハ W への露光条件の変化に応じて適宜再調整が行われる。具体的には、2 次光源の大きさ・形状、変形照明を露光条件とし、変形照明の形状及び大きさ、レチクル R に形成された回路パターン D P の種類、及び投影光学系 P L の開口数のうちの少なくとも 1 つを変更した際に、外部調整機構 3 2 及び調整装置 3 4

(平行板駆動装置 35) を駆動して投影光学系の収差の調整を行う。ここで、上述した変形照明とは、例えば、輪帯変形照明若しくは照明のコヒーレンシ  $\sigma$  ( $\sigma$  値 = 照明光学系の射出側開口数 / 投影光学系の入射側開口数) を変化した照明、又は多極 (例えば 4 極) 状に照明光を分割した多重極照明等である。

図 2 A, B は、投影光学系 PL の下端部に配置される調整装置 34 の構造を説明する図である。図 2 A は調整装置 34 の側方の断面構造を模式的に示す図であり、図 2 B は、調整装置 34 の側面の構造を示す図である。調整装置 34 は、平行平板 6 を内部に保持固定するための金具である第 1 部材 34 a と、この第 1 部材 34 a と鏡筒 30 との間に配置される金具である第 2 部材 34 b とを備える。第 1 部材 34 a と第 2 部材 34 b とは、光軸 AX に垂直な面から僅かに傾いた摺り合わせ面 p1 を介して摺動可能に連結されており、第 1 部材 34 a 及び第 2 部材 34 b を光軸 AX の回りに相対的に回転させることにより、光軸 AX に対する平行平板 6 の法線の傾き角を調節できるようになっている。尚、光軸 AX と摺り合わせ面 p1 との傾き角は、平行平板 6 の法線の光軸 AX に対する最大の傾き角の  $1/2$  に設定されている。つまり、図示の状態から第 1 部材 34 a が第 2 部材 34 b に対して  $180^\circ$  回転すると、平行平板 6 の法線の光軸 AX に対する傾き角は、光軸 AX と摺り合わせ面 p1 との傾き角の 2 倍となる。

第 2 部材 34 b と鏡筒 30 とは、光軸 AX に垂直な摺り合わせ面 p2 を介して摺動可能に連結されており、第 2 部材 34 b 及び鏡筒 30 を光軸 AX の回りに相対的に回転させることにより、光軸 AX に対する平行平板 6 の法線の傾き方向が調節可能になっている。第 1 部材 34 a と第 2 部材 34 b との相対的な回転位置は、第 1 部材 34 a の上端周囲に設けた目盛環 SC1 を、第 2 部材 34 b の下端の一箇所に設けた指標 m1 で読み取ることにより視覚的に検出することができる。また、第 2 部材 34 b の鏡筒 30 との相対的な回転位置は、第 2 部材 34 b の上端周囲に設けた目盛環 SC2 を、鏡筒 30 の下端の一箇所に設けた指標 m1 で読み取ることにより視覚的に検出することができる。平行板駆動装置 35 に設けた第 1 駆動部 35 a は、第 1 部材 34 a と第 2 部材 34 b との相対的な回転位置を調整して、平行平板 6 を光軸 AX に垂直な面から所望の角度だけ傾ける。これにより、鏡筒 30 内で生じた特定方向の偏心コマ収差のみを独立して補正す

ることができる。一方、第2駆動部35bは、第1部材34aと鏡筒30との相対的な回転位置を調整して、平行平板6の傾き方向を適宜設定する。これにより、偏心コマ収差の補正方向を調節することができる。尚、第1部材34aと第2部材34bとの相対的な回転位置や、第1部材34aと鏡筒30との相対的な回転位置は、両駆動部35a、35bによる駆動量をモニタすることにより電氣的に検出することもできる。例えば、第1部材34aと第2部材34bとの相対的な回転位置を両駆動部35aの駆動量に基づいて検出することにより、この回転位置を第1部材34aの傾き角に換算することができる。

図3は、第1部材34aに保持されている平行平板6の傾き角と偏心コマ収差の発生及び補正との関係を概念的に説明する図である。例えば、図3中の実線で示すように平行平板6とウェハWとが平行になっている場合、鏡筒30からの照明光ILはウェハW上の点P1に結像するものとする。この状態から平行平板6を2点鎖線で示すように僅かに傾けると、照明光ILは、偏心コマ収差によって点P1に結像しなくなる。具体的には、照明光ILのうち光軸AXに沿って進行してきた光は、平行平板6によって平行移動して点P1の近傍の点P2に結像するが、照明光ILのうち開口角で進行してきた光は、平行平板6の比較的大きな作用を受けて平行移動し、点P2よりも点P1から離れた点P3に結像する。つまり、鏡筒30によって偏心コマ収差が生じていなかったとしても、平行平板6を傾けることによって偏心コマ収差が生じてしまう。このことは、当初2点鎖線で示す照明光ILのような偏心コマ収差が生じていた場合、平行平板6を時計方向に回転させることによって偏心コマ収差を補正できることを意味する。尚、この調整装置34の詳細については、例えば、米国特許6235438号を参照されたい。ここでは、米国特許6235438号の開示を参考として援用する。

図1に戻り、調整装置34の下端部には、ガラス枠36が螺合されており、ガラス枠36内には、曲面を有するガラス板8が装着されている。このガラス板8の厚さを変更することにより、投影光学系PLの下端からウェハWまでの光学長を変更して球面収差を調整することができる。また、仮に投影光学系PLがペッツバールの条件を満たしておらず、像面歪曲収差を生じている場合には、このガ

ラス板 8 の曲率半径を変更することで、投影光学系 P L の像面歪曲を調整することができる。ここで、ペッツパールの条件とは、像面歪曲を生じさせないための条件であり、ペッツパールの和が 0 となることである。ペッツパールの和を変えるためには、投影光学系 P L の焦点距離を変化させる必要がある。このためには、種々の厚み及び曲率半径を有するガラス板 8 が装着された複数のガラス枠 3 6 を予め用意しておき、後述する球面収差及び像面収差を調整する際にガラス枠 3 6 ごと交換するのが便利である。ガラス板 8 による収差の調整の際にはガラス枠 3 6 だけ交換すればよいので、投影光学装置 P L を分解する必要はない。ガラス板 8 の厚み及び曲率半径の設定方法についての詳細は、例えば特開平 9 - 3 2 9 7 4 2 号公報を参照されたい。

以上、本発明の一実施形態による露光装置及び投影光学系の構成について説明したが、次に、投影光学系 P L の製造の際に用いられる組立装置、位相回復法を用いた収差測定装置、及び波面収差を測定する波面収差測定装置について順に説明する。尚、上記の位相回復法を用いた収差測定装置及び波面収差を測定する波面収差測定装置の何れも、波面収差を測定する測定装置であるが、各々を区別するために、前者を単に「収差測定装置」と称し、後者を「波面収差測定装置」と称する。尚、このように、本実施形態では、投影光学系 P L の残存収差を測定するために、「収差測定装置」及び「波面収差測定装置」を用いている。その理由は、「波面収差測定装置」の測定精度が「収差測定装置」の測定精度よりも高く、従って、投影光学系 P L の製造過程において、「収差測定装置」を用いて投影光学系 P L の残存収差をある程度まで減少させ、その後は計測精度の高い「波面収差測定装置」を用いて計測を行いつつ残存収差の極めて少ない投影光学系 P L を製造するためである。

#### 〔組立装置〕

図 4 は、本発明の一実施形態による投影光学系を製造する際に用いられる組立装置の構成を概略的に示す断面図である。図 4 に示したように、組立装置は、定盤部 5 1 a と該定盤部 5 1 a から立設した柱部 5 1 b とを有する架台 5 1 と、架台 5 1 の定盤部 5 1 a 上に回転可能に設けられ、高い回転精度を有するエアスピンドルを用いた回転台 5 2 と、架台 5 1 の柱部 5 1 b に上下動可能に設けられた

上下動ステージ 5 3 とを備えている。上記回転台 5 2 は、その駆動手段として A C サーボモータ（図示略）を使用している。また、上下動ステージ 5 3 は、転がり軸受の直進案内、駆動用ボールねじとエンコーダ付き A C サーボモータ及び制動用電磁ブレーキ（いずれも図示略）により構成される。尚、上下動ステージ 2 の上下位置の検出は上記エンコーダによって行われる。

上下動ステージ 5 3 には、回転台 5 2 の上方に配された荷重低減部 5 4 と、荷重低減部 5 4 の下方に配された偏芯調整部 5 5 とが設けられている。荷重低減部 5 4 は、図 5 に示すように、上下動ステージ 5 3 から回転台 5 2 上方に配された上部環状ベース 5 3 a と、上部環状ベース 5 3 a の上部に設けられ、位置調整対象となる分割鏡筒 3 0 a、3 0 b、…、3 0 e の荷重を低減させる荷重低減機構 5 6 とを備えている。図 5 は、組立装置の荷重低減部 5 4 を示す要部の断面図である。荷重低減機構 5 6 は、上部環状ベース 5 3 a の上部に設けられ上下方向にロッド部 5 7 a を進退可能なエアシリンダ 5 7 と、ロッド部 5 7 a の上端にスラストベアリング 5 8 を挟み込むようにしてスラスト方向に移動可能に設けられた複数の爪部材 5 9 と、該爪部材 5 9 上に設けられエアシリンダ 5 7 の圧力を測定し制御するロードセル 6 0 とを備えている。

前記爪部材 5 9 は、内側に配された分割鏡筒 3 0 a、3 0 b、…、3 0 e の上部フランジ部に先端を引っかけることができるように断面 L 字状に形成されている。また、ロードセル 6 0 は、エアシリンダ 5 7 により爪部材 5 9 が上方に押し上げられた際に、上下動ステージ 5 3 に設けられた水平方向突出部 5 3 c の下部に当接するように配置されている。偏芯調整部 5 5 は、図 4 及び図 6 に示すように、上下動ステージ 5 3 から上部環状ベース 5 3 a の下方に配された下部環状ベース 5 3 b と、下部環状ベース 5 3 b に設けられ、その内側に配された分割鏡筒 3 0 a の水平方向（光軸に交差する方向）位置を検出する接触式電気マイクロメータ（位置計測機構、変位計）6 1 と、下部環状ベース 5 3 b の上部に設けられ、その内側に配された分割鏡筒 3 0 a の偏芯調整を行う偏芯調整機構 6 2 とを備えている。図 6 は、組立装置の偏芯調整部 5 5 を示す要部の断面図である。接触式電気マイクロメータ 6 1 は、分割鏡筒 3 0 a 外周部の基準外径部分に接触端子 6 1 a の先端を接触させて基準外径部分の振れ（光軸ずれ）を計測するものである。

尚、接触式電気マイクロメータ 6 1 の代わりに、レーザ変位計や静電容量変位計を用いてもよい。また、接触式電気マイクロメータ 6 1 を、上部環状ベース 5 3 a に設けても構わない。

偏芯調整機構 6 2 は、図 6 に示すように、下部環状ベース 5 3 b 上に LM（直線案内）ガイド 6 5 を介して支持され、半径方向に進退可能なチャック 6 2 A を二対備えている。これらのチャック 6 2 A は、進退方向が互いに直交するように設置され、内側の分割鏡筒 3 0 a を前後左右から挟み込むことができるようになっている。チャック 6 2 A の駆動は、一对のチャック 6 2 A を上部で連結したチャック用エアシリンダ 6 3 により行われ、各チャック 6 2 A の半径方向内側に突出した一对の支持凸部 6 2 a の先端で分割鏡筒 3 0 a、3 0 b、…、3 0 e の下部を挟むようになっている。尚、各チャック 6 2 A 及びチャック用エアシリンダ 6 3 は、上部環状ベース 5 3 a 等に干渉しないように配されている。また、各チャック 6 2 A には、支持凸部 6 2 a より下方に配され半径方向内側に向けて進退可能なりニアアクチュエータ（位置決め機構）が設けられている。

符号 6 6 は、以上説明した組立装置に組み立て指示を出力するコンピュータである。このコンピュータ 6 6 には、組み立てる投影光学系 PL の設計データ及びレンズ素子 2 各々の屈折率分布、面形状、及び厚さ等の計測データが予め入力され、これらのデータに基づいてコンピュータ 6 6 は、投影光学系 PL の光学特性をシミュレーションにより求める。そして、シミュレーションにより得られた結果に基づいて、光学特性が最適となる各レンズ素子 2 の分割鏡筒 3 0 a ~ 3 0 e への組み込み位置、組み込み角度（レンズ素子 2 の光軸周りの回転位置）、分割鏡筒 3 0 a ~ 3 0 e の間隔等を指示する組み込み情報を組立装置に出力する。

以上、組立装置の構成について説明したが、次に、分割鏡筒 3 0 a、3 0 b、…、3 0 e の組み立て工程の概略について説明する。まず、投影光学系 PL の最下部に位置する分割鏡筒 3 0 a を回転台 5 2 上に載置する。載置後、上下動ステージ 5 3 を、接触式電気マイクロメータ 6 1 の接触端子 6 1 a が分割鏡筒 3 0 a の基準外径部分に当接する位置に移動させる（尚、予め爪部材 5 9 は半径方向外方に退避させておく）。この状態で、回転台 5 2 を回転させることにより、接触式電気マイクロメータ 6 1 で回転台 5 2 に対する分割鏡筒 3 0 a の振れ（位置ず

れ、光軸ずれ)を計測する。この後、上下動ステージ53を下げるとともに、チャック用エアシリンダ63によってチャック62Aを互いに接近する方向に移動させ、分割鏡筒30aの下部フランジ部外側面を挟む。その時、リニアアクチュエータが回転台52の外周面に対向する。

更に、爪部材59を半径方向内側に移動させて分割鏡筒30aの上部フランジ部に引っかける。この状態で、エアシリンダ57を駆動して爪部材59を介して分割鏡筒30aを上方向(回転台52から離れる方向)に押圧して力を加えることにより、回転台52に加わる分割鏡筒30aの荷重を減らし、両者間の摩擦力を低減させておく。このとき、ロードセル60が水平方向突出部53cの下部に当接してエアシリンダ57の圧力を計測し、この値によってエアシリンダ57それぞれの圧力が同じ値になるように調整される。この状態で、各リニアアクチュエータの先端を回転台52の外周面に当接させるとともに、計測された振れに基づいて、各リニアアクチュエータを進退させることにより、回転台52に対して分割鏡筒D1を相対的に水平方向(分割鏡筒30aの光軸と交差する方向)に移動させて偏芯調整(光軸ずれの補正)を行う。偏芯調整後、エアシリンダ57による加圧を解除するとともに、チャック用エアシリンダ63によってチャック62Aの間隔を拡げ、分割鏡筒30aの支持を解除する。

次に、二番目の分割鏡筒30bを分割鏡筒30a上に載置し、分割鏡筒30aと同様に振れ測定及び偏芯調整を行う。即ち、上下動ステージ53を上方に移動して、接触式電気マイクロメータ61の接触端子61aが分割鏡筒30bの外周面に当接する位置に移動させる。この状態で、回転台52を回転させることにより、接触式電気マイクロメータ61で回転台52及び分割鏡筒30aに対する分割鏡筒30bの振れ(位置ずれ、光軸ずれ)を計測する。この後、上下動ステージ53を下げて、チャック用エアシリンダ63によってチャック62Aを互いに接近する方向に移動させ、分割鏡筒30bの下部フランジ部外側面を挟む。その時、リニアアクチュエータが分割鏡筒30aの上部フランジ部外側面に対向する。更に、爪部材59を半径方向内側に移動させて分割鏡筒30bの上部フランジ部に引っかける。この状態で、エアシリンダ57を駆動して爪部材59を介して分割鏡筒30bを上方向(分割鏡筒30aから離れる方向)に押圧して力を加える

ことにより、分割鏡筒 30 a に加わる分割鏡筒 30 b の荷重を減らし、両者間の摩擦力を低減させておく。(図 4)

この状態で、各リニアアクチュエータの先端を分割鏡筒 30 a の外周面に当接させるとともに、計測された振れに基づいて、各リニアアクチュエータを進退させることにより、分割鏡筒 30 a に対して分割鏡筒 30 b を相対的に水平方向(分割鏡筒 30 b の光軸と交差する方向)に移動させて偏芯調整(光軸ずれの補正)を行う。偏芯調整後、エアシリンダ 57 による加圧を解除するとともに、分割鏡筒 30 a と分割鏡筒 30 b とを互いに両者のフランジ部分でボルト止めして固定する。この後、チャック 62 A の間隔を拡げ、分割鏡筒 30 b の支持を解除する。以降、次の分割鏡筒 30 c から最上部の分割鏡筒 30 e まで、順次同様の工程によって偏芯調整するとともに互いに固定して組み立てることにより、投影光学系 PL が製造される。

〔位相回復法を用いた収差測定装置(収差測定装置)〕

図 7 に、位相回復法を用いた収差測定装置(収差測定装置)の概略構成を示す。図 7 に示すように、収差測定装置は、投影光学系 PL に適した波長の照明光(例えば、投影光学系 PL を設計する際に用いた中心波長を有し、波長幅が狭く、高コヒーレンシの照明光)を射出する照明光源 70 と、ピンホール 72 が形成されたパターン板 71、投影光学系 PL の結像位置に前側焦点位置が配置された対物レンズ系 73、及び対物レンズ系 73 で集光された光を撮像する CCD (Charge Coupled Device) 等の撮像素子 74、及び撮像素子 74 から出力される撮像信号の信号強度分布に基づいて位相回復法に基づく所定の演算処理を行う処理部 75 とを備える。以上のように、位相回復法を用いた収差測定装置(収差測定装置)は、簡素な装置構成であって安価であり、投影光学系 PL の残収差を容易に求めることができるという利点を有する。

以上説明した構成の収差測定装置を用いて投影光学系 PL の残収差を測定する場合には、まず、図 7 に示すように、投影光学系 PL の物体面にパターン板 71 のパターン形成面を位置決めするとともに、投影光学系 PL の結像位置(像面)に対物レンズ系 73 の前側焦点位置を位置決めする。その後、照明光源 70 から射出される照明光により、パターン板 71 に形成されたピンホール 72 を照明し



て理想的な球面波を発生させる。この理想的な球面波が投影光学系 P L を通過すると、投影光学系 P L に残存する収差の影響を受けて理想的な球面の波面形状が変化する。投影光学系 P L を通過した光を対物光学系 7 3 で集光し、その像を撮像素子 7 4 で撮像して得られた撮像信号の強度分布は、投影光学系 P L の残存収差に応じて変化する。よって、投影光学系 P L の残存収差に関する情報を含む画像信号を用い、位相回復法に基づく所定の演算を行うことにより、投影光学系 P L の残存収差を求めることができる。尚、上述した位相回復法の詳細な内容については、米国特許第 4 3 0 9 6 0 2 号等を参照されたい。

〔波面収差測定装置〕

図 8 は、波面収差測定装置の概略構成を示す図である。尚、図 8 に示した波面収差測定装置は、K r F エキシマレーザ（248 nm）から射出される光の波長に適した投影光学系 P L の波面収差を測定する際に用いられる波面収差測定装置である。図 8 に示す波面収差測定装置は、A r イオンレーザ光を出射する A r イオンレーザ発振器 8 1 と、フィゾーレンズ 8 2 を有する波面干渉計部 8 4 と、A r イオンレーザ光を波面干渉計部 8 4 へ導くミラー M 2 ～M 5 と、干渉縞を微小変化させるピエゾ素子 9 0 と、カメラ等の撮像素子 9 0 と、投影光学系 P L の波面収差などの演算処理を行う処理装置 8 6 とを備えている。図 8 に示した例では波面干渉計部 8 4 はフィゾー型干渉計で構成されている。

また、A r イオンレーザ発振器 8 1 として、A r イオンレーザ光の第 2 高調波（波長が 496.5 nm の A r イオンレーザ光の 2 倍高調波で、波長が 248.25 nm のレーザ光）を出射する第 2 高調波発振器を用いている。A r イオンレーザ発振器 8 1 とミラー M 2 との間には、ハーフミラー M 1 が設けられている。A r イオンレーザ発振器 8 1 から出射された A r イオンレーザ光の第 2 高調波（以下単にレーザ光という）は、ハーフミラー M 1 を透過し、ミラー M 2、ミラー M 3、ミラー M 4、及びミラー M 5 で順に反射されて波面干渉計部 8 4 のハーフミラー M 6 に入射するように構成されている。波面干渉計部 8 4 は、ハーフミラー M 6 を透過したレーザ光をビームエキスパンダ 8 7 により拡げて反射ミラー 8 8 で垂直下方へ反射させ、この反射光を、フィゾーレンズ 8 2 の最終球面であるフィゾー面（参照面）8 3 及び投影光学系 P L に入射させ、フィゾー面 8 3 で

反射された参照光L R と、フィゾー面 8 3 及び投影光学系 P L を透過して反射球面 8 5 で反射され、再び投影光学系 P L を透過した被検光L D とを合成して干渉縞を発生させるように構成されている。ピエゾ素子 8 9 は、フィゾーレンズ 8 2 を光軸方向（Z 軸方向）に微小変位させ、波面干渉計部 8 4 により発生する干渉縞を微小変化させるために設けられる。

フィゾーレンズ 8 2 を含む波面干渉計部 8 4 は、X 軸、Y 軸、Z 軸方向に移動可能な 3 軸ステージ上に載置されている。一方、反射球面 8 5 は、フィゾーレンズ 8 2 とは別の 3 軸ステージ上に載置されている。また、フィゾーレンズ 8 2 の焦点位置及び反射球面 8 5 の焦点位置（曲率中心）をそれぞれ測定する測長干渉計（図示略）が設けられている。尚、ミラー M 5 は、X 軸方向には移動不能であり、Y 軸方向にのみ波面干渉計部 8 4 と一緒に移動するように構成されている。これによって、波面干渉計部 8 4 及び反射球面 8 5 が X 軸及び Y 軸方向に移動しても、A r イオンレーザ発振器 8 1 から出射したレーザ光を常に波面干渉計部 8 4 のハーフミラー M 6 に入射させることができる。ハーフミラー M 1 の反射光路中には、A r イオンレーザ発振器 8 1 から出射される A r イオンレーザ光の基本波又は第 2 高調波の発振波長を測定する波長モニタ 9 1 が設けられている。そして、処理装置 8 6 は、波長モニタ 9 1 により測定される前記発振波長の変動を補正するように構成されている。

上記構成において、A r イオンレーザ発振器 8 1 から射出されたレーザ光は、ハーフミラー M 1 を透過し、ミラー M 2、ミラー M 3、ミラー M 4、及びミラー M 5 でそれぞれ反射された後、波面干渉計部 8 4 のハーフミラー M 6 に入射する。ハーフミラー M 6 を透過したレーザ光はビームエキスパンダ 8 7 により拡げられて反射ミラー 8 8 で反射される。この反射光はフィゾーレンズ 8 2 及び投影光学系 P L に入射し、フィゾー面 8 3 で反射された参照光 L R と、フィゾー面 8 3 及び投影光学系 P L を透過して反射球面 8 5 で反射され、再び投影光学系 P L を透過した被検光 L D とが、反射ミラー 8 8 で反射されて合成され、干渉縞が発生する。この干渉縞がビームエキスパンダ 8 7 及びハーフミラー M 6 を経て撮像素子 9 0 に入射し、撮像素子 9 0 により撮像される。撮像素子 9 0 は、入射した干渉縞の画像情報の信号を処理装置 8 6 へ出力する。ピエゾ素子 8 9 によりフ

イゾーレンズ 82 を光軸方向（Z 方向）に微小変位させて干渉縞を微小変化させながら、撮像素子 90 で干渉縞を撮像することにより、処理装置 86 が、撮像素子 90 から出力される干渉縞の画像情報の信号に基づき、投影光学系 PL の波面収差を演算処理して求める。この演算結果を不図示の表示装置で表示したり、不図示のプリンタにより出力することができる。

以上、KrF エキシマレーザ（248 nm）から射出される光の波長に適した投影光学系 PL の波面収差を測定する際に用いられる波面収差測定装置について説明したが、この波面収差測定装置の詳細については、例えば米国特許 5898501 号を参照されたい。また、ArF エキシマレーザ（193 nm）から射出される光の波長に適した投影光学系 PL の波面収差を測定する波面収差測定装置の詳細については、特開 2000-97616 号公報を、超高圧水銀ランプ等から射出される i 線（365 nm）に適した投影光学系 PL の波面収差を測定する波面収差測定装置の詳細については、例えば米国特許 5898501 号をそれぞれ参照されたい。ここでは、米国特許 5898501 号の開示を参考として援用する。

〔波面収差のツェルニケ（Zernike）の多項式による表現方法〕

次に、本実施形態では、図 7 に示した収差測定装置又は図 8 に示した波面収差測定装置を用いて測定した波面収差の取り扱いを容易にするために、波面収差をツェルニケ多項式により表現している。そこで、以下、波面収差及びその各成分のツェルニケ多項式による表現について基本的な事項を説明する。ツェルニケ多項式の表現では、座標系として極座標を用い、直交関数系としてツェルニケの円筒関数（所定の関数）を用いる。

まず、射出瞳面上に極座標を定め、得られた波面収差  $W$  を、 $W(\rho, \theta)$  として表わす。ここで、 $\rho$  は射出瞳の半径を 1 に規格化した規格化瞳半径であり、 $\theta$  は極座標の動径角である。次いで、波面収差  $W(\rho, \theta)$  を、ツェルニケの円筒関数系  $Z_n(\rho, \theta)$  を用いて、次の（1）式に示すように展開する。

$$\begin{aligned} W(\rho, \theta) &= \sum C_n Z_n(\rho, \theta) \\ &= C_1 \cdot Z_1(\rho, \theta) + C_2 \cdot Z_2(\rho, \theta) \\ &\quad \dots + C_n \cdot Z_n(\rho, \theta) \quad \dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 $C_n$ は展開係数（ツェルニケ係数）である。以下、ツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho, \theta)$ のうち、第1項～第36項にかかる円筒関数系 $Z_1 \sim Z_{36}$ は、次に示す通りである。

$n : Z_n(\rho, \theta)$

1 : 1

2 :  $\rho \cos \theta$

3 :  $\rho \sin \theta$

4 :  $2\rho^2 - 1$

5 :  $\rho^2 \cos 2\theta$

6 :  $\rho^2 \sin 2\theta$

7 :  $(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$

8 :  $(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$

9 :  $6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$

10 :  $\rho^3 \cos 3\theta$

11 :  $\rho^3 \sin 3\theta$

12 :  $(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\theta$

13 :  $(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\theta$

14 :  $(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta$

15 :  $(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta$

16 :  $20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$

17 :  $\rho^4 \cos 4\theta$

18 :  $\rho^4 \sin 4\theta$

19 :  $(5\rho^2 - 4)\rho^3 \cos 3\theta$

20 :  $(5\rho^2 - 4)\rho^3 \sin 3\theta$

21 :  $(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \cos 2\theta$

22 :  $(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \sin 2\theta$

23 :  $(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 - 4)\rho \cos \theta$

24 :  $(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 - 4)\rho \sin \theta$

25 :  $70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1$

$$26: \rho^5 \cos 5\theta$$

$$27: \rho^5 \sin 5\theta$$

$$28: (6\rho^2 - 5) \rho^4 \cos 4\theta$$

$$29: (6\rho^2 - 5) \rho^4 \sin 4\theta$$

$$30: (21\rho^4 - 30\rho^2 + 10) \rho^3 \cos 3\theta$$

$$31: (21\rho^4 - 30\rho^2 + 10) \rho^3 \sin 3\theta$$

$$32: (56\rho^6 - 104\rho^4 + 60\rho^2 - 10) \rho^2 \cos 2\theta$$

$$33: (56\rho^6 - 104\rho^4 + 60\rho^2 - 10) \rho^2 \sin 2\theta$$

$$34: (126\rho^8 - 280\rho^6 + 210\rho^4 - 60\rho^2 + 5) \rho \cos \theta$$

$$35: (126\rho^8 - 280\rho^6 + 210\rho^4 - 60\rho^2 + 5) \rho \sin \theta$$

$$36: 252\rho^{10} - 630\rho^8 + 560\rho^6 - 210\rho^4 + 30\rho^2 - 1$$

従来技術における波面収差Wに基づく評価手法は、波面収差の全成分Wの最大最小の差（P-V値）やRMS（root mean square：自乗平均平方根）値を評価指標として用いていた。しかしながら、波面収差の全成分WのP-V値やRMS値による評価では同じ値となる場合でも、各項の展開係数C1、C2、・・・の組み合わせによっては、所望の性能を達成することができない場合がある。従って、本発明では、波面収差Wの各成分について考えている。

まず、波面収差Wを、回転対称成分と奇数対称成分と偶数対称成分とに分類することができる。ここで、回転対称成分とは、 $\theta$ を含まない項、すなわち、ある座標での値と、その座標を瞳の中央を中心として任意の角度だけ回転した座標での値とが等しい回転対称な成分である。また、奇数対称成分とは、 $\sin \theta$ （または $\cos \theta$ ）、 $\sin 3\theta$ （または $\cos 3\theta$ ）などの、動径角 $\theta$ の奇数倍の3角関数を含む項、すなわち、ある座標での値と、その座標を瞳の中央を中心として360°の奇数分の1だけ回転した座標での値とが等しい奇数対称な成分である。更に、偶数対称成分とは、 $\sin 2\theta$ （または $\cos 2\theta$ ）、 $\sin 4\theta$ （または $\cos 4\theta$ ）などの、動径角 $\theta$ の偶数倍の3角関数を含む項、すなわち、ある座標での値と、その座標を瞳の中央を中心として360°の偶数分の1だけ回転した座標での値とが等しい偶数対称な成分である。

この場合、波面収差Wの回転対称成分 $W_{\text{rot}}$ 、奇数対称成分 $W_{\text{odd}}$ 、及び偶数

対称成分  $W_{\text{evn}}$  は、それぞれ次の式 (2) ~ (4) で表される。以下、表現の簡素化のために、原則として第  $n$  項の展開係数  $C_n$  をもって第  $n$  項を表すこととする。すなわち、以下の式 (2) ~ (4) 及び各成分の表現において、 $C_n$  は  $C_n \cdot Z_n$  を意味するものとする。

$$W_{\text{rot}}(\rho, \theta) = C_4 + C_{16} + C_{25} + C_{36} \cdots (2)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{odd}}(\rho, \theta) = & C_7 + C_8 + C_{10} + C_{11} + C_{14} + C_{15} \\ & + C_{19} + C_{20} + C_{23} + C_{24} + C_{26} \\ & + C_{27} + C_{30} + C_{31} + C_{34} + C_{35} \cdots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{evn}}(\rho, \theta) = & C_5 + C_6 + C_{12} + C_{13} + C_{17} + C_{18} \\ & + C_{21} + C_{22} + C_{28} + C_{29} + C_{32} \\ & + C_{33} \cdots (4) \end{aligned}$$

#### 〔投影光学系の製造方法〕

次に、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法について説明する。本実施形態による投影光学系の製造方法の詳細を説明する前に、理解を容易にするために、その概略について簡単に説明する。図9は、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の概略を示すフローチャートである。図9に示したように、本実施形態の投影光学系  $PL$  の製造方法は、投影光学系の組み立て工程  $S1$ 、波面収差計測工程  $S2$ 、波面収差成分算出工程  $S3$ 、第1調整工程  $S4$ 、及び第2調整工程  $S5$  を有する。

投影光学系の組み立て工程  $S1$  では、1つ又は複数の光学部材を分割鏡筒  $30a \sim 30e$  内に組み込んで分割鏡筒  $30a \sim 30e$  各々を組み立てるとともに、組み立てた分割鏡筒  $30a \sim 30e$  を組立装置 (図4~図6参照) を用いて組み立てることにより投影光学系  $PL$  を得る。波面収差計測工程  $S2$  では、図7に示した収差測定装置又は図8に示した波面収差測定装置を用いて組み立てた投影光学系  $PL$  に残存する収差を測定する。波面収差成分算出工程  $S3$  では、波面収差計測工程  $S2$  の測定結果に基づいて上述したツェルニケ係数を求め、投影光学系  $PL$  に残存する波面収差をツェルニケの多項式で表現する。また、組み立てた投影光学系  $PL$  を介して所定のパターン (例えば、理想格子) の像をウェハ  $W$  に転写し、その転写結果から投影光学系のディストーション (歪曲収差) を求める。

これは、投影光学系 P L と収差測定装置又は波面収差測定装置との相対的な位置ずれに応じて波面収差計測工程 S 2 の計測結果の展開係数 C 2 及び C 3 にかかる第 2 項及び第 3 項の値が実際の投影光学系 P L に残存する収差と異なる値が計測されるためである。よって、実際にパターンを転写した結果及び展開係数 C 4 以降の展開係数で表現される波面収差から展開係数 C 2 及び C 3 にかかる第 2 項及び第 3 項の値を求め、正確な波面収差をツェルニケの多項式で表現している。展開係数 C 2 及び C 3 は、上述したようにチルト成分に関するものであり、波面が投影光学系 P L の光軸に対して直交する平面からどれだけ傾斜しているかを示すものである。従って、このチルト成分は結果としてディストーションに大きな影響を与えるものであるため、実際に所定のパターンを転写することにより正確な値を求めている。

第 1 調整工程 S 4 では、波面収差成分算出工程 S 3 で求められたツェルニケ係数で示される波面収差に基づいて投影光学系 P L の調整を行う。調整は、基本的には投影光学系 P L 内に組み込まれている光学部材の姿勢（光学部材の光軸 A X 方向の位置、光軸 A X に直交する面内における位置（偏心）、光軸 A X に直交する軸周りの回転位置、光軸 A X 周りの回転位置を含む）を調整することにより行うが、ここでは、投影光学系 P L の設計値から投影光学系の光学部材の配置等を考慮して、投影光学系 P L の調整後の性能予測値をシミュレーションにより予め求めながら投影光学系 P L の調整を行う。また、シミュレーションにより、光学部材の姿勢調整により残収差が所定値以下に補正することができないと判断された場合には、投影光学系 P L 内の光学部材を交換して再組み立てを行う。更に、投影光学系 P L に残存する収差を補正できる非球面形状をシミュレーションにより算出し、このシミュレーション結果により投影光学系 P L 内の所定の光学部材に非球面を形成している。第 1 調整工程では、第 2 調整工程で調整された後の投影光学系 P L の性能の予測値が所定の性能を有するまでかかる調整を行う。

第 2 調整工程 S 5 では、投影光学系 P L に設けられる外部調整機構（例えば、図 1 に示した、調整部材 3 2 a ～ 3 2 e や平行板駆動装置 3 5）を用いて投影光学系 P L 内に設けられる光学部材の姿勢を外部から調整する。また、必要であれば、投影光学系 P L のウェハ W に近接する光学部材（例えば、図 1 中のガラス板

8等)やレチクルRに近接する図示せぬ光学部材の少なくとも一方の交換を行う。更に必要であれば、照明光の波長を変えることにより、投影光学系PLに適した波長を可変する調整を行う。第2調整工程では、第2調整工程では投影光学系の性能が最終的な性能を有するまでかかる調整を行う。

以上、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の概略について説明したが、次にその詳細なフローについて説明する。図10～図12は、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法の詳細なフローを示すフローチャートである。尚、フローチャートでは判断工程をひし形の枠で図示するのが一般的であるが、図10～図12においては、図示の都合上、判断工程(例えば、図10中の工程S16、S22、S26)を図示のように表している。

投影光学系PLを製造するには、まず、コンピュータ66が図4に示した組立装置に組み込み指示を出力し(工程S10)、組立装置がコンピュータ66からの組み込み指示に基づいて、レンズ素子2等の1つ又は複数の光学部材を分割鏡筒30a～30e内に組み込んで分割鏡筒30a～30e各々を組み立てるとともに、組み立てた分割鏡筒30a～30eを組立装置を用いて組み立てることにより投影光学系PLを得る(工程S12)。尚、図10中の工程S10及び工程S12は、図9中の組立工程S1に相当する。

ここで、分割鏡筒30a～30eに組み込まれる光学部材には、屈折率分布の不均質性及び加工面の製造誤差が生じているため、予めこれらを考慮して投影光学系PLの光学特性が最良(波面収差が最小)となるように光学部材を分割鏡筒30a～30eに組み込むことが製造効率を向上させる上で好ましい。以下、分割鏡筒30a～30e内に組み込まれる光学部材の製造から分割鏡筒に組み込まれるまでに行われる一連の工程の詳細について説明する。図17は、分割鏡筒30a～30e内に組み込まれる光学部材の製造から分割鏡筒に組み込まれるまでに行われる一連の工程の詳細を示すフローチャートである。

図17において、まず、各光学部材を形成すべきブロック硝材(ブランク)を製造した後、製造されたブロック硝材の屈折率の絶対値及び屈折率分布を図18に示す干渉計装置を用いて計測する(工程S100)。図18は、ブロック硝材の屈折率の絶対値及び屈折率分布を測定する干渉計装置の構成を示す図である。



図18に示した干渉計装置100では、制御系101に制御された干渉計ユニット102からの射出光が、フィゾーステージ103a上に支持されたフィゾーフラット（フィゾー平面）103に入射する。ここで、フィゾーフラット103で反射された光は参照光として干渉計ユニット102へ戻る。

一方、フィゾーフラット103を透過した光は測定光として試料ケース104内の被検物体に入射する。ここで、試料ケース104内にはオイル105が充填されており、試料ケース104の中の所定位置に被検物体である上述のブロック硝材106が配置される。ブロック硝材106を透過した光は、反射平面107によって反射され、ブロック硝材106及びフィゾーフラット103を介して干渉計ユニット102へ戻る。こうして、干渉計ユニット102へ戻った参照光と測定光との位相ずれに基づいて、各ブロック硝材106の屈折率分布による波面収差が、ひいては各光学部材の屈折率分布による波面収差が計測される。尚、屈折率均質性の干渉計による計測に関する詳細については、例えば米国特許6025955号を参照されたい。ここでは、米国特許6025955号の開示を参考として援用する。測定されたブロック硝材106の屈折率の絶対値及び屈折率分布は、図4に示したコンピュータ66に入力されてデータベース化される。尚、ブロック硝材106の屈折率分布には予め規格が定められており、計測の結果得られた屈折率分布が規格外であるブロック硝材106は用いない。

ブロック硝材106の屈折率の絶対値及び屈折率分布の計測が終了すると、次に、計測を終了したブロック硝材106に対して研削・研磨等の加工を行って投影光学系PL内に配置される光学部材を設計値通りに製造する工程を行う（工程S102）。尚、投影光学系PLの設計データは予めコンピュータ66に入力されている。次に、加工を終えた光学部材の加工面形状、曲率半径、及び中心厚を測定する工程が行われる（工程S104）。光学部材の加工面形状は、理想球面（ベストフィット球面）に対する加工面のずれを計測することにより測定される。光学部材の加工面形状は、例えばトワイマン・グリーン型干渉計又はフィーゾー型干渉計を応用した干渉計を用いて計測される。この干渉計の具体的な構成については、例えば米国特許5561525号または米国特許5563706号を参照されたい。ここでは、米国特許5561525号及び米国特許5563706

号の開示を参考として援用する。

光学部材の曲率半径は、ニュートンゲージを用いて又はレーザ干渉計を用いて測定する。ニュートンゲージを用いて測定する方法は、高い精度をもって形成された球面を有するニュートン原器上に光学部材を載置し、光学部材側から一定波長の光源、例えば水銀ランプやナトリウムランプから射出される光を照射したときに得られるニュートンリングを観察して光学部材の曲率半径を求める。ニュートンゲージを用いて光学部材の曲率半径を測定する方法の詳細は、例えば特開平5-272944号公報、特開平6-129836号公報、及び特開平6-174451号公報を参照されたい。また、レーザ干渉計で光学部材の曲率半径を測定する方法の詳細は、特開平5-340734号公報、特開平5-340735号公報、及び特開平5-346315号公報を参照されたい。

光学部材の中心厚は、図19Aに示した中心厚測定装置を用いて測定する。図19Aは、マイケルソン型干渉計を利用した中心厚測定装置の概略構成図である。この中心厚測定装置は、所定波長の測定光を射出する光源110、光学系111、及びハーフミラー112を備える。光学系111は、図示しないピンホール及びコリメートレンズ等からなり、光源110から射出された測定光を平行光束にしてハーフミラー112に入射させる。ハーフミラー112は、入射光束の一部を反射し、残りを透過する。

よって、光源110側から入射した光束の一部が、中心厚測定の対象である光学部材113側へ反射され、残りの光束が反射ミラー105側へ透過される。光学部材113側に反射された光束に対して、光学部材113のハーフミラー112側の表面及び光学部材113の裏面は、それぞれ反射面113a、113bとなっている。また、反射ミラー114は、図示しない移動ステージに取り付けられ、移動ステージとともに図19A中の符号116を付した矢印の方向に移動可能に構成されており、ハーフミラー112を透過した光束を反射してハーフミラー112に戻す。

光学部材113で反射した光束は、計測光としてハーフミラー112を透過して受光素子106に入射する。一方、反射ミラー114で反射した光束は、参照光としてハーフミラー112で反射されて受光素子106に至る。これらの計測

光及び参照光は、受光素子106上で干渉するよう設定される。受光素子106は、この計測光と参照光との干渉光を光電変換し、干渉信号として外部に出力する。

図19Bは、光源110に可干渉距離が測定する間隔よりも十分小さいものを使用したときの受光素子106に入射される干渉光の強度と反射ミラー114の位置との関係を示す図である。ここで、計測光がハーフミラー112で分離され、光学部材113の反射面113aで反射され、再びハーフミラー112に至る光路の光路長をA1とする。また、計測光がハーフミラー112で分離され、光学部材113の反射面113bで反射され、再びハーフミラー112に到る光路の光路長をA2とする。更に、参照光がハーフミラー112で分離され、反射ミラー114で反射され、再びハーフミラー112に至る光路の光路長をBとする。

反射面113a、113bで反射した計測光は、ハーフミラー112により反射ミラー114で反射した参照光と光路長差に応じて干渉することになる。つまり、各計測光と参照光とは、光路長A1、A2と光路長Bとがほぼ等しくなった場合に干渉し、このときに強度が変化する干渉光が得られる。よって、反射ミラー114の位置をずらすことにより、光路長Bが光路長A1とほぼ等しくなると、受光素子106に入射される干渉光の強度は、図19Bにおいて符号113aで指し示した波形のように変化する。また、光路長Bが光路長A2とほぼ等しくなると、受光素子107に入射される干渉光の強度は、図19Bにおいて符号113bで指し示した波形のように変化する。

尚、計測光と参照光とが分離されてハーフミラー112で再び合成されるまでの間で、計測光及び参照光が例えば屈折率が低い媒質から入射して屈折率の高い媒質との境界面で反射するような場合、例えば反射面113aで反射する場合は、位相の180度反転、いわゆる位相の飛びを生じる。この場合、干渉光の強度分布は、図19(b)において符号113bで指し示した干渉光の強度変化に対する符号113aで指し示した干渉光の強度変化のように、その振幅のほぼ中心に対して反転した状態となる。そして、干渉光の強度分布に対応して受光素子106から出力される干渉信号と移動ステージで設定される反射ミラー114の位置とに基づいて光学部材113の中心厚が求められる。尚、光学部材の中心厚

を測定するには、上述した測定方法以外に、測定針を用いて接触式で測定しても良い。また、加工された光学部材には、通常、反射防止膜が形成されるが、この反射防止膜は、以上説明した測定の前に形成しても後に形成しても良い。

以上説明した測定方法により測定された光学部材の加工面形状、曲率半径、及び中心厚は、図4に示したコンピュータ66に入力されてデータベース化される。次に、測定された屈折率分布、加工面形状、曲率半径、及び中心厚を有する光学部材を用いて投影光学系PL組み立てた際の特性を、コンピュータ66によるシミュレーションによって予測する工程を行う（工程S106）。具体的には、まず投影光学系PLが備える光学部材の間隔を設計値通りに設定した上で、上記の測定結果を各光学部材に加味した投影光学系PLの特性を得る。ここで、投影光学系PLの特性の評価は、例えば波面収差の全成分WのP-V値やRMS値を用いて行う。

次に、シミュレーションにて仮想的に組み立てられた光学部材の間隔、光軸周りの回転角（組み込み角度）を可変させたときの投影光学系PLの特性をシミュレーションで求める。工程S102で製造された光学部材には前述したような屈折率分布の不均質や製造誤差が生じているため、光学部材の光軸周りの回転角

（組み込み角度）のみを変えた場合でも投影光学系PLの特性は変化する。ここでは、最も光学特性が良くなるよう各光学部材の間隔と組み込み角度とを最適化する（工程S108）。以上の工程を経てシミュレーションにより光学部材の間隔と組み込み角度が最適化されると、コンピュータ66は図4に示した組立装置に組み込み情報を出力する。組立装置はコンピュータ66からの組み込み情報を受けると、この組み込み情報に含まれる最適化された光学部材の間隔及び組み込み角度通りに光学部材を分割鏡筒30a～30e内に組み込んで分割鏡筒30a～30e各々を組み立てるとともに、組み立てた分割鏡筒30a～30eを組立装置を用いて組み立てることにより、投影光学系PLを得る（工程S110）。

組立装置により投影光学系PLが組み立てられると、次に、図7に示した収差測定装置を用いて波面収差を計測する（工程S14）。ここで、投影光学系PLの残存収差を計測するためには、図7に示したように、パターン板71に形成されたピンホール72が投影光学系PLの光軸AX上に配置している場合のみ

ならず、光軸AXに直交する面内の複数の計測点（例えば、数十点）にピンホール72を配置した状態で波面収差を測定する必要がある。そこで、この工程では、光軸AXに直交する面内においてピンホール72の位置を計測点に移動させつつ波面収差を測定する。尚、パターン板71を移動させるのではなく、パターン板71に複数のピンホールを形成し、照明光源70内に照明領域を規定する部材を設け、一度に1つのピンホールを照明することにより波面収差を計測するようにしても良い。

次に、全ての計測点で波面収差が測定可能か否かが判断される（工程S16）。図7に示した収差測定装置は、撮像素子74で撮像して得られた撮像信号に対して位相回復法に基づく所定の演算を行うことにより、投影光学系PLの残存収差を求めているが、位相回復法では投影光学系PLの残存収差が大きすぎると波面を復元することができない。そこで、工程S16では、全ての測定点において波面収差が測定可能か否かが判断される。収差測定が不可能な計測点が1つでもあると判断された場合（判断結果が「NO」）の場合には、組立装置で分割鏡筒30a～30eの間隔調整や分割鏡筒30a～30e間の偏心調整を行い（工程S18）、調整後、工程S14に戻る。

一方、工程S16において、全ての計測点で収差測定可能である場合（判断結果が「YES」）の場合には、収差測定装置で全計測点における波面収差を計測する（工程S20）。計測が終了すると、波面収差のRMS値及びディストーションが所定の規格内であるか否かを判断する（工程S22）。この工程は、後述する高精度の収差測定ができる程度に投影光学系PLが調整されているか否かを判断する工程である。この判断結果が「NO」の場合には、分割鏡筒30a～30eの間隔調整や分割鏡筒30a～30e間の偏心調整を行い（工程S24）、調整後、工程S20に戻る。

一方、工程S22の判断結果が「YES」の場合、つまり後述する高精度の収差測定ができる程度に投影光学系PLが調整されてると判断された場合には、センターアス成分及び非等方的ディストーションが所定の規格内であるか否かを判断する（工程S26）。ここで、センターアス成分とは、投影光学系PLの投影領域の中心で生ずるアス成分である。また、非等方的ディストーションとは、結

像倍率が像面内の所定の子午方向とこれに直交する子午方向とで異なるような収差をいう。工程 S 2 2 の判断結果が「NO」の場合には、センターアス成分補正用の光学部材を回転することによりセンターアス成分を調整する（工程 S 2 8）。ここで、センターアス成分補正用の光学部材は、例えば X 軸方向の曲率と Y 軸方向の曲率とが異なるトーリック面が形成された光学部材である。よって、このトーリック面が形成された光学部材を回転させることにより、センターアス成分を補正することができる。

次に、トーリック面が形成された光学部材を用いてセンターアス成分を補正する原理について簡単に説明する。図 1 3 A, B は、センターアス成分を補正する原理を説明するための図である。これらの図において、光学部材 9 5, 9 6 は、投影光学系 P L を構成する光学部材中の一部の光学部材である。これらの光学部材 9 5, 9 6 のうちの少なくとも一方は、光軸 A X を中心として回転可能に設けられている。そして、光学部材 9 5, 9 6 は、それぞれ曲率半径の最も強い方向 9 5 A, 9 6 A と、これら方向 9 5 A, 9 6 A と直交した方向であってそれぞれ曲率半径の最も弱い方向 9 5 B, 9 6 B とを有している。ここで、図中実線で示す方向 9 5 A, 9 6 A では光学部材 9 5, 9 6 の屈折力が最も強くなり、図中破線で示す方向 9 5 B, 9 6 B では光学部材の屈折力が最も弱くなる。尚、以下においては、曲率半径（屈折力）が最も強くなる方向 9 5 A, 9 6 A を強主経線と称し、曲率半径（屈折力）が最も弱くなる方向 9 5 B, 9 6 B を弱主経線と称する。

図 1 3 (a) に示すように、2 つの光学部材 9 5, 9 6 において強主経線 9 5 A, 9 6 A が互いに 90 度をなす場合には、これら 2 つの光学部材 9 5, 9 6 からは、センターアス成分又は非等方的ディストーションは発生しない。また、図 1 3 (b) に示すように、2 つの光学部材 9 5, 9 6 において、強主経線 9 5 A, 9 6 A のなす角度を 90 度から外した場合には、これらのなす角度に応じた量の軸上センターアス成分又は非等方的ディストーションが発生する。

従って、例えば、投影光学系 P L を構成する光学部材のうち、2 つの光学部材の光学面を、所定の子午方向とこの子午方向と直交する方向とで異なるパワーを有する形状とし、且つ光軸 A X を中心として相対的に回転可能とすれば、センタ

ーアス成分又は非等方的ディストーションの一方を補正することができる。更に、上記2つの光学部材とは異なる2つの光学部材の光学面を、所定の子午方向とこの子午方向と直交する方向とで異なるパワーを有する形状とし、かつ光軸を中心として相対的に回転可能とすれば、センターアス成分及び非等方的ディストーションの双方を補正することができる。尚、センターアス成分の発生量を調整するための光学面は、投影光学系PLの瞳近傍に設けることが好ましく、非等方的ディストーションの発生量を調整するための光学面は、物体面又は像面近傍に設けることが好ましい。尚、センターアス成分及び非等方的ディストーションを調整する方法の詳細は、例えば米国特許5852518号、米国特許6262793号、及び特開2000-164489号公報等を参照されたい。ここでは、米国特許5852518号及び米国特許6262793号の開示を参考として援用する。

図10に戻り、センターアス及び／又は非等方的ディストーション補正用の光学部材を回転して調整した後は、工程S20に戻り、再度波面収差測定が行われる。一方、センターアス及び非等方的ディストーションが所定の規格内である場合（工程S26の判断結果が「YES」の場合）には、工程S30へ進む。つまり、以上の工程S14～工程S26までの工程は、高精度の収差測定を行うことができる程度に投影光学系PLの調整を行う工程であり、工程S26の判断結果が「YES」になると、高精度の収差測定を行う程度に投影光学系PLに残存する収差が補正されていることを意味する。

次に、図8に示した波面測定装置を用いて高精度の波面収差計測を行うとともに（工程S30）、所定のパターン（例えば理想格子）の像を、投影光学系PLを介してウェハWへ転写する（工程S32）。そして、工程S30の計測結果に対してツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho, \theta)$ をフィッティングして各項毎の展開係数 $C_n$ （ツェルニケ係数）を求め、波面収差の成分を算出する処理が処理装置86で行われる（工程S34）。ここで、展開係数 $C_n$ を算出すると、展開係数 $C_n$ とツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho, \theta)$ を用いて、前述した（1）式から波面収差 $W(\rho, \theta)$ を最終的に得ることができる。

尚、本実施形態では、投影光学系PLと収差測定装置又は波面収差測定装置と

の相対的な位置ずれに応じて、波面収差計測工程 S 2 の計測結果の展開係数 C 2 及び C 3 にかかる第 2 項及び第 3 項の値が実際の投影光学系に残存する収差とは異なる値に計測されてしまうため、展開係数 C 2 及び C 3 にかかる第 2 項及び第 3 項に関連するディストーション値を波面収差の各成分（展開係数 C 4 以降）の値とは別に管理している。この場合、工程 S 3 2 における所定のパターンを転写した結果と工程 S 3 4 で算出された展開係数 C 4 以降の展開係数で決定される波面収差とから、展開係数 C 2 及び C 3 にかかる第 2 項及び第 3 項の値を求め、正確な波面収差をツェルニケの多項式で表現し、この波面収差成分（展開係数 C 2 以降）を用いても良い。

次に、算出された波面収差の各成分の値及び計測されたディストーションの値を用いて、投影光学系 P L が算出された波面収差の各成分の値及び計測されたディストーションの値を有している場合における、外部調整機構（図 1 に示した調整部材 3 2 a ～ 3 2 e、平行板駆動装置 3 5、及びガラス板 8）を用いて調整した後の波面収差（又は波面収差の各成分）とディストーションとを、シミュレーションで予測する。具体的には、算出された波面収差の各成分の値及び計測されたディストーションの値を出発点とし、外部調整機構のパラメータ（調整部材 3 2 a ～ 3 2 e の移動量、平行板駆動装置 3 5 の駆動量、及びガラス板 8 の形状・厚さ）として最適化し、最適化された後の投影光学系 P L の収差（波面収差及びディストーション）を求める。

そして、予測された波面収差及びディストーションが所定の規格内であるか否かが所定装置 8 6 で判断される（工程 S 3 8）。ここで、所定の規格としては、例えば、上述した波面収差の回転対称成分、奇数対称成分及び偶数対称成分毎の規格や、各展開係数毎の規格、複数の展開係数を複数のグルーピングした成分毎の規格等が考えられる。また、所定の規格として、波面収差から予測される空間像またはレジストパターン像を用いても良い。このときには、例えば空間像における線幅異常値や T F D（像面平坦性）等を用いることができる。

工程 S 3 8 の判断結果が「NO」の場合には、分割鏡筒 3 0 a ～ 3 0 e の間隔を調整することによって、規格外の波面収差及びディストーションが規格内となるか否かが、処理装置 8 6 で判断される（工程 S 4 0）。この判断結果が「YE



S」の場合には、組立装置に分割鏡筒 30 a ~ 30 e の間隔を調整する指示が出力され、この指示に基づいて組立装置が分割鏡筒 30 a ~ 30 e の間隔を調整し、必要であれば分割鏡筒 30 a ~ 30 e の光軸 A X に対する偏心、分割鏡筒 30 a ~ 30 e に組み込まれた所定の光学部材の回転、及びガラス板 8 の交換を行う（工程 S 4 2）。ここで、ガラス板 8 を異なる曲率半径を有するガラス板に交換するのは、ベッツパールの条件を満足することにより投影光学系 P L で生ずる像面歪曲を調整するためである。工程 S 4 2 を終了した後は、工程 S 3 0 に戻り、波面収差の計測等を行う。尚、本実施形態では、分割鏡筒間の間隔・偏心を調整したが、工程 S 4 0 において分割鏡筒間の間隔・偏心調整では収差の修正が不可能であるときには、分割鏡筒内に収められている複数の光学部材（レンズ等）の間隔、偏心をそれぞれ独立に調整する工程を実行した後に、後述の工程 S 4 6 へ移行しても良い。

これらの工程 S 3 0 ~ 工程 S 4 2 は、投影光学系 P L 内の光学部材に非球面を形成することなく、どこまで投影光学系 P L の光学性能が向上可能かを求める工程である。一方、工程 S 4 0 において、分割鏡筒 30 a ~ 30 e の間隔調整のみを行う際には、規格外と判断された波面収差及びディストーションの修正が不可能であると判断された場合（工程 S 4 0 の判断結果が「NO」の場合）には、収差を補正する非球面形状を算出する工程（工程 S 4 4、S 4 6）、所定の光学部材に非球面を形成する工程（工程 S 5 0）、及び非球面が形成された光学部材を投影光学系 P L へ組み込む工程（工程 S 5 2）へ移行する。

工程 S 4 4 では、分割鏡筒 30 a ~ 30 e の間隔調整及び偏心調整を行った後の波面収差（又は波面収差の各成分）とディストーションとをシミュレーションで予測する。具体的には、算出された波面収差の各成分の値及び計測されたディストーションの値を出発点とし、分割鏡筒 30 a ~ 30 e の間隔調整量及び偏心調整量パラメータとして最適化し、最適化された後の投影光学系 P L の収差（波面収差及びディストーション）を求める。そして、シミュレーションされた残留収差（工程 S 4 4 における最適化された後の投影光学系 P L の収差）を補正することができる非球面形状を算出する（工程 S 4 6）。

工程 S 4 6 では、補正する収差に応じて非球面を形成する少なくとも 2 つの光

学部材が選択される。図 1 4 は、非球面が形成される光学部材を説明するための図である。図 1 4 に示した投影光学系 P L は、図示を簡略化しており、レチクル R 側から順に正の屈折力を有する光学部材 e 1、負の屈折力を有する光学部材 e 2、正の屈折力を有する光学部材 e 3、負の屈折力を有する光学部材 e 4、開口絞り A S、及び正の屈折力を有する光学部材 e 5 を有している。

いま、レチクル R 上の異なる 2 つの物点 Q 1、Q 2 からの光が投影光学系 P L を通過する際の光路について考える。図中符号 L 1 は物点 Q 1 から射出される光束の光路であり、符号 L 2 は物点 Q 2 から射出される光束の光路である。投影光学系 P L の光軸 A X とレチクル R との交点に位置する物点 Q 1 からの光は、光学部材 e 1 ~ e 5 を通過する度に光軸 A X に関して対称に発散又は集束されて、光軸 A X とウェハ W との交点に結像する。ここで、光学部材 e 1 ~ e 5 の有効径を  $\phi 1 \sim \phi 5$  とする。また、各光学部材 e 1 ~ e 5 を通過する際の光束 L 1 の光束径を  $\phi L11 \sim \phi L15$  とし、各光学部材 e 1 ~ e 5 を通過する際の光束 L 2 の光束径を  $\phi L21 \sim \phi L25$  とする。

光束 L 1、L 2 が光学部材 e 1 を通過する際の光路を考えると、光学部材 e 1 の有効径  $\phi 1$  に対する光束径  $\phi L11$  の比及び光学部材 e 1 の有効径  $\phi 1$  に対する光束径  $\phi L21$  の比は約 0.25 程度であり、しかも、光束 L 1 が光学部材 e 1 を通過する位置と光束 L 2 が光学部材 e 1 を通過する位置とは異なる。次に、光束 L 1、L 2 が光学部材 e 5 を通過する際の光路を考えると、光学部材 e 5 の有効径  $\phi 5$  に対する光束径  $\phi L15$  の比及び光学部材 e 5 の有効径  $\phi 5$  に対する光束径  $\phi L25$  の比は、ほぼ 1 に近い値となる。しかも、光束 L 1 が光学部材 e 5 を通過する位置と光束 L 2 が光学部材 e 5 を通過する位置とはほぼ同一である。

よって、工程 S 4 6 において投影光学系 P L 内の光学部材の非球面を算出する際には、図 1 4 を用いて説明した光束の通過経路を考慮して有効に収差を補正することができる光学部材を選択する必要がある。例えば像面座標依存性の高い収差（ディストーション、像面湾曲等）を補正する場合には、物点 Q 1 からの光束 L 1 と物点 Q 2 からの光束 L 2 とが分離した位置を通過する光学部材 e 1 の光学面（レンズ面、反射面等）に非球面を設けると、像面座標依存性の高い収差を効果的に補正することができる。また、瞳座標依存性の高い収差（例えば球面収差、

偏心コマ収差等)を補正する場合には、物点Q 1からの光束L 1及び物点Q 2からの光束L 2がほぼ全面を通過する光学部材e 5の光学面に非球面を設けると、瞳座標依存性の高い収差を効果的に補正することができる。

なお、像面座標依存性及び瞳座標依存性が同等に近い収差(例えばコマ収差等)に関しては、物点Q 1からの光束L 1及び物点Q 2からの光束L 2の重畳の程度が中間的となる光学部材(例えば光学部材e 2等)の光学面に非球面を設ければ、像面座標依存性及び瞳座標依存性が同等に近い収差を効果的に補正することができる。従って、非球面形状算出工程である工程S 4 6では、投影光学系P L中の複数の光学部材e 1～e 5のうち、少なくとも3つの光学部材の光学面に関して非球面形状を算出することが好ましい。そして、コマ収差等の像面座標依存性及び瞳座標依存性が同等に近い収差をより効果的に補正するためには、物点Q 1からの光束L 1及び物点Q 2からの光束L 2の重畳の程度が中間的となる2つ光学部材の光学面に関する非球面形状を算出することが望ましいため、工程S 4 6では、投影光学系P L中の複数の光学部材e 1～e 5のうち、少なくとも4つの光学部材の光学面に関して非球面形状を算出することがさらに好ましい。

尚、光学部材e 1～e 5に形成する非球面は、光軸A Xに対して対称・非対称の何れであってもよい。更には、発生する収差に応じて不規則(ランダム)に非球面を形成しても良い。尚、工程S 4 6で算出される非球面は、必ずしも投影光学系P Lに残存する波面収差全てを補正する目的のものに限られず、特定の残存収差だけを補正する目的のものであっても良い。例えば、後述する外部調整機構で補正できる波面収差はこの工程S 4 6では敢えて補正せずに、外部調整機構で補正するようにしても良い。また、投影光学系P Lの残存波面収差の内、結像性能を鑑みて無視できるものは非球面形成により補正しなくとも良い。

図1 0及び図1 1に戻って、工程S 4 8では、工程S 4 6で選択された光学部材の光学面を、当該工程S 4 6で算出された非球面形状とするように加工(研磨)を行う。そして、工程S 5 0へ移行し、非球面に加工された光学部材を投影光学系P L中へ再度組み込む。非球面を形成する場合には、分割鏡筒3 0 a～3 0 eから非球面加工する光学部材を抜き出して加工した後に、再度抜き出した位置に光学部材を組み込む。ここで、再度組み込み誤差が生ずると考えられるが、ここ

で発生する組み込み誤差は、図7に示した収差測定装置で計測不可能となる程には大きくないと考えられるので、工程S50の後には、図10に示した工程S20へ戻る。

さて、工程S38において、予測された波面収差及びディストーションが所定の規格内である場合（判断結果が「YES」である場合）には、投影光学系PLの光学特性が外部調整機構により微調整できる程度に調整されている場合であるため、外部調整機構の取り付けと、その初期調整を行う（工程S52）。本実施形態の投影光学系PLは投影光学系PLの製造が終了した後でも、光学特性を微調整する外部調整機構が設けられている。ここでいう外部調整機構とは、図1に示した調整部材32a～32e、平行板駆動装置35、及びガラス板8をいう。つまり、調整部材32aにより、所定の光学部材の光軸AX方向の位置及び光軸AXに直交する面に対する傾斜を微調整することができるとともに、光軸AXに垂直な面内における位置（偏心）を微調整することができる。更に、トーリック面が形成された光学部材の光軸AX周りの回転を調整することができる。また、平行板駆動装置35を用いて平行平板6の光軸AXに直交する面に対する傾斜角を可変することで、偏心コマ収差を調整することができる。更に、投影光学系PLを分解せずにガラス板8を変更することで、投影光学系PLがペッツバールの条件を満足するように調整することができる。

ここで、外部調整機構の初期調整では、主にレンズコントローラ部29（図1参照）からの制御信号に対して調整部材32a～32eの応答量を調整する処理が行われる。具体的には、例えば、レンズコントローラ29から調整部材32a～32eに対して1 $\mu$ m伸長せよとの制御信号が出力されたときに、制御信号通りに調整部材32a～32eが1 $\mu$ m伸長しない場合があるので、レンズコントローラ29の制御量に対する調整部材32a～32eの応答量を調整する。ここで、レンズコントローラ29から出力される制御信号は投影光学系PLの光学的な性能を可変する信号であるので、つまりこの初期調整は、外部調整機構による調整量と投影光学系PLの性能の変化量との相関を求める処理である。尚、調整部材32a～32eが取り付けられると、組立装置を用いた分割鏡筒32a～32eの間隔調整等は行われず、外部調整機構を用いた調整のみが行われる。

以上の工程が終了すると、上述の工程S30～工程S34と同様に、図8に示した波面測定装置を用いて波面収差計測を行うとともに（工程S54）、所定のパターン（例えば理想格子）の像を投影光学系PLを介してウェハWへ転写する（工程S56）。そして、工程S54の計測結果に対してツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho, \theta)$ をフィッティングして各項毎の展開係数 $C_n$ （ツェルニケ係数）を求め、波面収差の成分を算出する処理（工程S58）が順に行われる。この工程においても、工程S34と同様に、展開係数 $C_2$ 及び $C_3$ にかかる第2項及び第3項に関連するディストーション値を、波面収差の各成分（展開係数 $C_4$ 以降）の値とは別に管理している。この場合、工程S54における所定のパターンを転写した結果と、工程S56で算出された展開係数 $C_4$ 以降の展開係数で決定される波面収差とから、展開係数 $C_2$ 及び $C_3$ にかかる第2項及び第3項の値を求め、正確な波面収差をツェルニケの多項式で表現し、この波面収差成分（展開係数 $C_2$ 以降）を用いても良い。以上の処理が終了すると、波面収差及びディストーションが所定の規格内であるか否かが判断される（工程S60）。

工程S60の判断結果が「NO」の場合には、調整部材32a～32eを用いて光学部材の姿勢（光学部材の光軸AX方向の位置、光軸AXに直交する面内における位置（偏心）、光軸AXに直交する軸周りの回転位置、光軸AX周りの回転位置を含む）を調整し、必要であれば平行平板6の傾斜角の調整を行い、ガラス板8を交換する（工程S62）。一方、工程S60の判断結果が「YES」の場合には、投影光学系PLの製造が完了する。

以上、本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法について説明した。上記実施形態の工程S62においては、更にレチクルRに最近接する光学部材を非球面加工して投影光学系PLに残存する収差（特に、ディストーション）を補正するようにしても良い。更に、工程S62では、投影光学系PLに適した波長を可変して異なる波長に設定することにより、投影光学系PLの分散を利用して残収差を補正するようにしても良い。また、投影光学系PLの光軸AX方向におけるレチクルRの位置や光軸AXに対する傾斜を調整することにより、ディストーション及び球面収差を補正するようにしても良い。更に、投影光学系PLの光軸AX方向におけるウェハWの位置を調整することにより、投影光学系PL内部

の光学部材の調整に起因して生ずる投影光学系 P L のフォーカス位置（最良結像位置）を調整しても良い。また更に、投影光学系 P L の光軸 A X に垂直な面内におけるウェハステージの位置を調整することにより投影光学系 P L から投影される像の横ズレ（像シフト）を補正し、投影光学系 P L の光軸 A X に対するウェハステージの傾斜角度を調整することにより投影光学系 P L から投影される像の傾斜（像チルト）を補正しても良い。

以上説明した本発明の一実施形態による投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系 P L の波面収差等の光学特性を調整するために変更することができる量又は交換することができる部材をまとめると以下の通りである。

〔1〕 投影光学系 P L 内の光学部材の光軸 A X 方向の位置及び光軸 A X に対する傾斜

〔2〕 平行平板 6 の光軸 A X に対する傾斜

〔3〕 ガラス板 8 の厚み及び曲率半径

〔4〕 光軸 A X 方向のレチクル R の位置及び光軸 A X に対する傾斜

〔5〕 照明光 I L の波長

〔7〕 光軸 A X 方向のウェハステージの位置、光軸 A X に対する傾斜、及び光軸 A X に垂直な面内におけるウェハステージの位置

〔投影光学系の変形例及び外部調整機構の具体例〕

次に、投影光学系の変形例及び外部調整機構の具体例について説明する。図 20 は、本発明の一実施形態による露光装置が備える本発明の実施形態の変形例による投影光学系の概略構成を示す図であり、図 21 は、変形例による投影光学系の分割鏡筒のうちの一つを示す上面図である。尚、図 20 及び図 21 においても、図 1 に示した X Y Z 直交座標系と同様の X Y Z 直交座標系を設定して各部材の位置関係について説明する。

図 20 に示すように、鏡筒 30 は複数の分割鏡筒 30 a ~ 30 l を備えており、フランジ 31 を介して、図示せぬ露光装置のフレームに支持されている。これら複数の分割鏡筒 30 a ~ 30 l は、光軸 A X 方向に積層されている。そして、本変形例では、複数の分割鏡筒 30 a ~ 30 l のうち、分割鏡筒 30 b, 30 d, 30 e, 30 f, 30 g により支持されているレンズ 2 b, 2 d, 2 e, 2 f,

2 g は、光軸 A X 方向（Z 方向）に移動可能かつ X 方向又は Y 方向を軸として傾斜（チルト）可能な可動レンズとなっている。レンズ 2 b, 2 d, 2 e, 2 f, 2 g を保持している分割鏡筒 3 0 b, 3 0 d, 3 0 e, 3 0 f, 3 0 g の構成につき、分割鏡筒 3 0 b の構成を代表させて説明する。尚、他の分割鏡筒 3 0 d, 3 0 e, 3 0 f, 3 0 g の構成については、分割鏡筒 3 0 b の構成とほぼ同様であるため、ここでは説明を省略する。

分割鏡筒 3 0 b は、分割鏡筒 3 0 b の（Z 方向）上下に位置する分割鏡筒 3 0 a, 3 0 c に接続される外側環 3 7 b と、レンズ 2 b を保持するレンズ室 3 8 b とを備えている。このレンズ室 3 8 b は、外側環 3 7 b に対して光軸方向（Z 方向）に移動可能かつ X 軸に平行な軸又は Y 軸に平行な軸の周りでチルト可能となるように、外側環 3 7 b に連結されている。また、分割鏡筒 3 0 b は、外側環 3 7 b に取り付けられたアクチュエータ 3 2 b を備えている。このアクチュエータ 3 2 b としては、例えば圧電素子を適用することができる。アクチュエータ 3 2 b は、例えば弾性ヒンジから構成される変位拡大機構としてのリンク機構を介してレンズ室 3 8 b を駆動する。このアクチュエータ 3 2 b は、分割鏡筒 3 0 b の 3 箇所に取り付けられており、これにより、レンズ室 3 8 の 3 箇所が独立に光軸方向（Z 方向）へ移動する。

この構造を、図 2 1 を参照して詳述する。尚、以下の説明では分割鏡筒 3 0 b, 3 0 d, 3 0 e, 3 0 f, 3 0 g 及びそれを構成する各部材を区別せずにそれらの何れかを指定する場合には、符号の末尾に付される記号「a」～「g」を省略して説明する。図 2 1 において、レンズ 2 の周縁には、3 つの罅部 2 0 1～2 0 3 が X Y 平面内における方位角  $120^\circ$  毎に設けられている。そして、レンズ室 3 8 は、クランプ部 3 8 1～3 8 3 を備えており、これらがレンズ 2 の 3 つの罅部 2 0 1～2 0 3 を保持している。そして、レンズ室 3 8 は、X Y 平面内における方位角  $120^\circ$  ごとの駆動点 D P 1～D P 3 の位置で、リンク機構を介して 3 つのアクチュエータ（不図示）により Z 方向に沿って独立に駆動される。

ここで、3 つのアクチュエータによる Z 方向の駆動量が同じ量である場合には、レンズ室 3 8 は外側環 3 7 に対し Z 方向（光軸方向）へ移動することとなり、3 つのアクチュエータによる Z 方向の駆動量が異なる量である場合には、レンズ室

38は外側環37に対しX軸に平行な軸又はY軸に平行な軸の周りで傾くこととなる。尚、3つのアクチュエータによるZ方向の駆動量が異なる量である場合には、レンズ室38が外側環37に対しZ方向（光軸方向）へ移動することもあり得る。

さて、図20に戻って、分割鏡筒30bは、外側環37bに取り付けられた、例えば光学式エンコーダからなる駆動量計測部39bを備えている。この駆動量計測部39bは、図21に示した方位角 $120^\circ$ ごとの3つの計測点MP1～MP3の位置における外側環37bに対するレンズ室38bのZ方向（光軸方向）の移動量を計測する。従って、アクチュエータ32b及び駆動量計測部39bにより、レンズ室38bの移動、ひいてはレンズ2bの移動をクローズドループで制御することができる。分割鏡筒30b、30d、30e、30f、30gに設けられているアクチュエータ32、駆動量計測部39、及びレンズ室38は、本発明にいう外部調整機構の一部を構成する。

図20に示した分割鏡筒30a～30lのうち、分割鏡筒30a、30c、30h、30i、30j、30k、30lにより支持されているレンズ2a、2c、2h、2i、2j、2k、2lは、固定レンズとなっている。これらの固定レンズ2a、2c、2h、2i、2j、2k、2lを保持している分割鏡筒30a、30c、30h、30i、30j、30k、30lの構成を、分割鏡筒30cの構成を用いて説明する。尚、分割鏡筒30c以外の他の分割鏡筒30a、30h、30i、30j、30k、30lの構成については、分割鏡筒30cの構成とほぼ同様であるため、ここでは説明を省略する。分割鏡筒30cは、分割鏡筒30cの（Z方向）上下に位置する分割鏡筒30b、30dと接続される外側環37cと、当該外側環37cに取り付けられてレンズ2cを保持するレンズ室38cとを備えて構成される。

本変形例においては、アクチュエータ32として、高精度、低発熱、高剛性及び高クリーン度の圧電素子を使用して、この圧電素子の駆動力を弾性ヒンジからなるリンク機構により拡大させる構成としているため、圧電素子自体のコンパクト化を図れる利点がある。尚、アクチュエータ32を圧電素子で構成する代わりに、磁歪アクチュエータや流体圧アクチュエータで構成しても良い。また、上記



レンズ 2 a ~ 2 l は、単一のレンズ素子から構成されることもあり、複数のレンズ素子を組み合わせたレンズ群からなることもある。

以上の構成を有する投影光学系 PL においては、レンズ 2 a, 2 c, 2 h, 2 i, 2 j, 2 k, 2 l の姿勢（光軸 AX 方向の位置及び XY 平面に対する傾斜）を変えることなくレンズ 2 b, 2 d, 2 e, 2 f, 2 g の姿勢を可変することができる。外部調整機構によりこれらのレンズの内、1 つのレンズの姿勢を調整することにより、又は、複数のレンズの姿勢を互いに関連付けて調整することにより、投影光学系 PL で生ずる 5 つの回転対称収差及び 5 つの偏心収差を個別に補正することができる。

ここでいう 5 つの回転対称収差とは、倍率、ディストーション（歪曲収差）、コマ収差、像面湾曲収差、及び球面収差をいう。また、5 つの偏心収差とは、偏心ディストーション（歪曲収差）、偏心コマ収差、偏心アス収差、及び偏心球面収差をいう。但し、ここにいう偏心ディストーションには、図 2 2 A ~ C に示すような 2 種類のものがある。これらの図は、2 種類の偏心ディストーションを説明するための図である。いま、図 2 2 A に示す 4 つの頂点 T 1 ~ T 4 を有する矩形の像が偏心ディストーションのために図中右方向に歪む場合を考える。

図 2 2 B 及び図 2 2 C は、図 2 2 に示した像が偏心ディストーションにより歪んだ状態を示している。図 2 2 B に示した例及び図 2 2 C に示した例の何れの例においても、偏心ディストーションにより、矩形形状の像が図中右側に引っ張られた形状に変形している。図 2 2 B に示した例では、4 つの頂点 T 1 ~ T 4 の内、頂点 T 1, T 2 の位置は変化していないが、頂点 T 3, T 4 が符号 T 3 a, T 4 a を付した位置に変位しているため、像は頂点 T 1, T 2, T 3 a, T 4 a を直線で繋いだ四角形状に変形している。

一方、図 2 2 C に示した例では、頂点 T 3, T 4 の位置は変化していないが、頂点 T 1, T 2 が符号 T 1 a, T 2 a を付した位置に変位しているため、像は頂点 T 1 a, T 2 a, T 3, T 4 を直線で繋いだ四角形状に変形している。このように、偏心ディストーションは 2 種類存在するが、図 2 0 に示した投影光学系 PL では、レンズ 2 b, 2 d, 2 e, 2 f, 2 g の姿勢を調整することにより、何れの偏心ディストーションでも個別に補正することができる。

また、図20に示した投影光学系PLにより、波面収差等の光学特性を調整するために変更することができる量又は交換することができる部材を、図1に示した投影光学系と同様にまとめると以下の通りである。

- [1] 投影光学系PL内の光学部材（レンズ2b, 2d, 2e, 2f, 2g）の光軸AX方向の位置及び光軸AXに対する傾斜
- [2] 平行平板6の光軸AXに対する傾斜
- [3] ガラス板8の厚み及び曲率半径
- [4] 光軸AX方向のレチクルRの位置及び光軸AXに対する傾斜
- [5] 照明光ILの波長
- [7] 光軸AX方向のウェハステージの位置、光軸AXに対する傾斜、及び光軸AXに垂直な面内におけるウェハステージの位置

更に、図20に示した投影光学系PLが備える外部調整機構は、露光装置に組み込まれた後で露光処理が行われる際に、大気圧や温度等の環境変化や照射変動に起因する投影光学系PLの性能変化を補正するために用いられる。従来、これらの補正は、投影光学系PLのレチクルR側の特定の2つの光学部材の姿勢を制御したり、投影光学系内の気圧を可変させることにより行っていた。しかしながら、かかる従来の補正方法は補正の自由度が少なく、補正可能な収差もディストーションや偏心コマ収差等の特定の収差に限られていた。図20に示した投影光学系PLは、レンズ2b, 2d, 2e, 2f, 2g各々の姿勢を自由に制御することができるため、補正や調整の自由度が高く、補正可能な収差も、上述した5つの回転対称収差及び5つの偏心収差と多いため、微細なパターンをウェハW上に形成する上で極めて好適である。

更に、近年ではパターンの微細化に伴い、超解像技術を応用して照明光ILの照明条件を変更した変形照明を行うことが多い。変形照明とは、前述したように、例えば、輪帯変形照明若しくは照明のコヒーレンシ $\sigma$ （ $\sigma$ 値＝照明光学系の射出側開口数／投影光学系の入射側開口数）を変化した照明、又は多極（例えば4極や2極）状に照明光を分割した多重極照明等である。また、投影光学系PLの射出側側の開口数を照明条件に応じて変化させる場合もある。図20に示した投影光学系PLが備える外部調整機構では、設定された照明条件や投影光学系PL

の射出側開口数に応じてレンズ 2 b, 2 d, 2 e, 2 f, 2 g 各々の姿勢を自由に制御することにより照明条件等に応じた投影光学系 P L の光学特性を設定することもできる。

〔露光装置の製造方法〕

本発明の一実施形態による露光装置（図 1）は、ウェハ W を精度よく高速に位置制御することができ、スループットを向上しつつ高い露光精度で露光が可能となるように、光源 1 2 及び照明光学系 1 4、レチクルステージ 1 6 及び図示せぬ移動鏡や干渉計を含むレチクルアライメント系、ウェハステージ 1 8、ウェハホルダ 1 9、ウェハステージ制御系 2 4、レーザ干渉計 2 6、及び移動鏡 2 8 を含むウェハアライメント系、及び投影光学系 P L 等の図 1 に示された各要素が電氣的、機械的、又は光学的に連結して組み上げられた後、総合調整（電気調整、動作確認等）をすることにより製造される。露光装置を製造する際には、前述した投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系 P L を準備し、更に投影光学系 P L の物体面（第 1 面）にレチクルを位置決めするためのレチクルステージ 1 6 を準備し、投影光学系 P L の像面（第 2 面）にウェハ W を位置決めするためのウェハステージ 1 8 を準備する工程が設けられる。尚、露光装置の製造は、温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

前述した投影光学系の製造方法では、図 1 に示した調整部材 3 2 a ～ 3 2 e 等の外部調整機構を取り付けた後、最終調整を行って投影光学系 P L を製造する場合を例に挙げて説明した。しかしながら、外部調整機構を投影光学系 P L に取り付ける工程（図 1 2 中の工程 S 5 2）を行った後、投影光学系 P L を露光装置へ組み込んでから最終的な調整（図 1 2 中の工程 S 5 4 ～ S 6 2）を行うようにしても良い。この場合には露光装置が備える照明光学系 1 4 からの照明光 I L の波長を可変して投影光学系 P L に適した波長にすることにより、投影光学系 P L の分散を利用して残収差が補正される。また、光軸 A X に対するレチクル R の姿勢調整によるディストーション及び球面収差の補正は図 1 に示したレチクルステージ 1 6 の姿勢を制御して行われ、ウェハ W の姿勢調整による最良結像位置からのずれ、像シフト、及び像チルトの補正はウェハステージ 1 8 の姿勢を制御することにより行われる。

## 〔マイクロデバイスの製造方法〕

次に、本発明の一実施形態による露光装置をリソグラフィ工程で使用した本発明の一実施形態によるマイクロデバイスの製造方法について説明する。図15は、マイクロデバイス（ICやLSI等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン等）の製造例のフローチャートを示す図である。図15に示すように、まず、ステップS80（設計ステップ）において、マイクロデバイスの機能・性能設計（例えば、半導体デバイスの回路設計等）を行い、その機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップS81（マスク製作ステップ）において、設計した回路パターンを形成したマスク（レチクル）を製作する。一方、ステップS82（ウェハ製造ステップ）において、シリコン等の材料を用いてウェハを製造する。

次に、ステップS83（ウェハ処理ステップ）において、ステップS80～ステップS82で用意したマスクとウェハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウェハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップS84（デバイス組立ステップ）において、ステップS83で処理されたウェハを用いてデバイス組立を行う。このステップS84には、ダイシング工程、ボンディング工程、及びパッケージング工程（チップ封入）等の工程が必要に応じて含まれる。最後に、ステップS85（検査ステップ）において、ステップS84で作製されたマイクロデバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にマイクロデバイスが完成し、これが出荷される。

図16は、半導体デバイスの場合における、図15のステップS83の詳細なフローの一例を示す図である。図16では、ステップS91（酸化ステップ）において、ウェハの表面を酸化させる。ステップS92（CVDステップ）において、ウェハ表面に絶縁膜を形成する。ステップS93（電極形成ステップ）において、ウェハ上に電極を蒸着によって形成する。そして、ステップS94（イオン打込みステップ）において、ウェハにイオンを打ち込む。以上のステップS91～ステップS94は、それぞれウェハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

ウェハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のよ

うにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、ステップS 9 5（レジスト形成ステップ）において、ウェハに感光剤を塗布する。ステップS 9 6（露光ステップ）において、上で説明したリソグラフィシステム（露光装置）及び露光方法によってマスクの回路パターンをウェハに転写する。ステップS 9 7（現像ステップ）において、露光されたウェハを現像し、ステップS 9 8（エッチングステップ）において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップS 9 9（レジスト除去ステップ）において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウェハ上に多重に回路パターンが形成される。

以上、本発明の一実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に制限されず、本発明の範囲内で自由に変更が可能である。例えば、上記実施形態ではステップ・アンド・リピート方式の露光装置を例に挙げて説明したが、ステップ・アンド・スキャン方式の露光装置にも適用可能である。また、本実施形態の露光装置の照明光学系の光源は、248 nm（KrF）又は193 nm（ArF）の波長の光を供給するエキシマレーザ光源を例に挙げて説明したが、これに限らず、超高圧水銀ランプから射出されるg線（436 nm）及びi線（365 nm）等の紫外線や、F<sub>2</sub>レーザ（157 nm）から射出される真空紫外域のレーザ光を用いることができる。例えば、電子線を用いる場合には、電子銃として、熱電子放射型のランタンヘキサボライト（LaB<sub>6</sub>）、タンタル（Ta）を用いることができる。また、前述した実施形態においては、もちろん、半導体素子や液晶表示素子の製造に用いられる露光装置だけではなく、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられてデバイスパターンをセラミックウェハ上へ転写する露光装置、及びCCD等の撮像素子の製造に用いられる露光装置等にも本発明を適用することができる。

また、半導体素子等のマイクロデバイスだけではなく、光露光装置、EUV露光装置、X線露光装置、及び電子線露光装置等で使用されるレチクル又はマスクを製造するために、マザーレチクルからガラス基板やシリコンウェハ等へ回路パターンを転写する露光装置にも本発明を適用できる。ここで、DUV（深紫外）やVUV（真空紫外）光等を用いる露光装置では、一般的に透過型レチクルが用

いられ、レチクル基板としては石英ガラス、フッ素がドーピングされた石英ガラス、蛍石、フッ化マグネシウム、又は水晶等が用いられる。また、X線露光装置や電子線露光装置等では、透過型マスク（ステンシルマスク、メンブレンマスク）が用いられ、マスク基板としてはシリコンウェハ等が用いられる。尚、このような露光装置は、欧州特許出願公開1043625号公報、欧州特許出願公開1083462号公報、米国特許出願736423号（2000年12月15日出願）、特開平11-194479号公報、特開2000-12453号公報、及び特開2000-29202号等で提案されている。ここでは、欧州特許出願公開1043625号公報、欧州特許出願公開1083462号公報、及び米国特許出願736423号の開示を参考として援用する。

なお、上記実施形態では、一つの直線に沿った共通の光軸を有する投影光学系（直筒型投影光学系）を例に挙げて説明したが、本発明は、例えば米国特許6195213や米国特許出願769832号（2000年1月26日出願）で提案されている、複数の光軸を有する反射屈折型の投影光学系にも適用可能である。ここでは、米国特許6195213及び米国特許出願769832号の開示を参考として援用する。

## 請求の範囲

1. 第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法であって、  
1つ又は複数の光学部材がそれぞれ収納された複数の鏡筒を組み立てて投影光学系を得る組立工程と、  
組み立てられた前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測工程と、  
前記波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程と、  
前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒を調整する調整工程と  
を有する投影光学系の製造方法。
2. 第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法であって、  
複数の光学部材を組み立てて投影光学系を得る組立工程と、  
前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測工程と、  
前記波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程と、  
前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の光学部材を調整する第1及び第2の調整工程と、  
前記第2の調整工程の前に実行されて、前記第2の調整工程において調整された後の性能を予測する性能予測工程と、  
前記性能予測工程と前記第2の調整工程との間に実行されて、前記投影光学系の性能を、前記性能予測工程で予測された性能に基づいて判断する判断工程と、  
を有する投影光学系の製造方法。
3. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、  
前記波面収差計測工程が、前記第1の調整工程の前に実行される第1の波面収差計測工程と、前記第1の調整工程と前記判断工程との間に実行される第2の波面収差計測工程とを含み、  
前記波面収差成分算出工程が、前記第1の波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させる第1の波面収差成分算出工程と、前記第2の

波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させる第2の波面収差成分算出工程とを含む投影光学系の製造方法。

4. 請求の範囲第3項に記載の製造方法において、

前記第1調整工程が、前記光学部材を調整した後に残存する残存波面収差を補正できる非球面形状を算出する非球面形状算出工程を含む投影光学系の製造方法。

5. 請求の範囲第4項に記載の製造方法において、

前記非球面形状算出工程では、前記投影光学系の光軸に対して非回転対称成分を含む非球面を算出する投影光学系の製造方法。

6. 請求の範囲第5項に記載の製造方法において、

前記非球面形状算出工程で算出された非球面を、前記複数の光学部材のうちの少なくとも1つの所定の光学部材の光学面に形成する非球面形成工程を更に備える投影光学系の製造方法。

7. 請求の範囲第4項に記載の製造方法において、

前記非球面形状算出工程が、前記複数の光学部材のうちの少なくとも2つの光学部材の光学面に関して前記非球面形状を算出し、

物体面上の所定の一点からの光束が前記光学面を通過する際の光束の径を部分光束径とするとき、前記少なくとも2つの光学部材には、前記光学面の有効径に対する前記部分光束径が異なるものが選択される投影光学系の製造方法。

8. 請求の範囲第4項に記載の製造方法において、

前記判断工程では、前記投影光学系が所定の性能を有していない場合には、前記非球面形状算出工程へ移行する判断を行う投影光学系の製造方法。

9. 請求の範囲第3項に記載の製造方法において、

前記組立工程が、1つ又は複数の前記光学部材がそれぞれ収納された複数の鏡筒を組み立て、

前記調整工程では、前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒を調整する投影光学系の製造方法。

10. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、

前記第1調整工程が、前記光学部材を調整した後に残存する残存波面収差を補正できる非球面形状を算出する非球面形状算出工程を含む投影光学系の製造方法。



- 1 1. 請求の範囲第 1 0 項に記載の製造方法において、  
前記非球面形状算出工程では、前記投影光学系の光軸に対して非回転対称成分を含む非球面を算出する投影光学系の製造方法。
- 1 2. 請求の範囲第 1 0 項に記載の製造方法において、  
前記非球面形状算出工程で算出された非球面を、前記複数の光学部材のうちの少なくとも 1 つの所定の光学部材の光学面に形成する非球面形成工程を更に備える投影光学系の製造方法。
- 1 3. 請求の範囲第 1 2 項に記載の製造方法において、  
前記判断工程では、前記投影光学系が所定の性能を有していない場合には、前記非球面形状算出工程へ移行する判断を行う投影光学系の製造方法。
- 1 4. 請求の範囲第 1 0 項に記載の製造方法において、  
前記非球面形状算出工程が、前記複数の光学部材のうちの少なくとも 2 つの光学部材の光学面に関して前記非球面形状を算出し、  
物体面上の所定の一点からの光束が前記光学面を通過する際の光束の径を部分光束径とするとき、前記少なくとも 2 つの光学部材には、前記光学面の有効径に対する前記部分光束径が異なるものが選択される投影光学系の製造方法。
- 1 5. 請求の範囲第 1 0 項に記載の製造方法において、  
前記判断工程では、前記投影光学系が所定の性能を有していない場合に、前記非球面形状算出工程へ移行する判断を行う投影光学系の製造方法。
- 1 6. 請求の範囲第 1 0 項に記載の製造方法において、  
前記組立工程が、1 つ又は複数の前記光学部材がそれぞれ収納された複数の鏡筒を組み立て、  
前記調整工程では、前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒を調整する投影光学系の製造方法。
- 1 7. 請求の範囲第 2 項に記載の製造方法において、  
前記第 1 調整工程が、少なくとも前記光学部材の姿勢を調整する投影光学系の製造方法。
- 1 8. 請求の範囲第 2 項に記載の製造方法において、  
前記第 1 調整工程では、前記複数の光学部材のうちの少なくとも 1 つの光学部

材の交換を行う投影光学系の製造方法。

19. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、

前記第2調整工程では、前記投影光学系の外部から前記投影光学系の性能を調整することができる外部調整機構を用いて調整を行う投影光学系の製造方法。

20. 請求の範囲第19項に記載の製造方法において、

前記第2調整工程が、前記外部調整機構による調整量と前記投影光学系の性能の変化量との相関を求める工程を有する投影光学系の製造方法。

21. 請求の範囲第20項に記載の製造方法において、

前記組立工程が、1つ又は複数の前記光学部材がそれぞれ収納された複数の鏡筒を組み立て、

前記調整工程では、前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒を調整する投影光学系の製造方法。

22. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、

前記第2調整工程が、前記光学部材の姿勢を調整する補助工程と、前記複数の光学部材のうちの前記第1面及び／又は前記第2面近傍の光学部材の交換を行う補助工程との少なくとも何れか一方を行う投影光学系の製造方法。

23. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、

前記第2調整工程が、前記投影光学系の波長を設定する投影光学系の製造方法。

24. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、

前記第2調整工程が、前記第2面の姿勢を微調整する工程を含む投影光学系の製造方法。

25. 請求の範囲第2項に記載の製造方法において、

前記組立工程が、1つ又は複数の前記光学部材がそれぞれ収納された複数の鏡筒を組み立て、

前記調整工程では、前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の鏡筒を調整する投影光学系の製造方法。

26. 第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法であって、

複数の光学部材を組み立てて投影光学系を得る組立工程と、

組み立てられた前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測工程と、

前記第2工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程と、

前記第3工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記複数の光学部材を調整する調整工程と、

を備え、

前記調整工程が、前記光学部材を調整した後に残存する残存波面収差を補正できる非球面形状を算出する非球面形状算出補助工程を備え、

前記非球面形状算出補助工程では、前記複数の光学部材のうちの少なくとも2つの光学部材の光学面に関して前記非球面形状を算出し、

物体面上の所定の一点からの光束が前記光学面を通過する際の光束の径を部分光束径とするとき、前記少なくとも2つの光学部材には、前記光学面の有効径に対する前記部分光束径が異なるものが選択される投影光学系の製造方法。

27. 請求の範囲第26項に記載の製造方法において、

前記非球面形状算出補助工程では、前記投影光学系の光軸に対して非回転対称成分を含む非球面を算出する投影光学系の製造方法。

28. 第1面の像を第2面上に結像させる投影光学系の製造方法であって、

複数の光学部材を組み立てて投影光学系を得る組立工程と、

前記光学部材の内の特定の光学部材を外部から調整する外部調整機構を前記投影光学系に取り付ける取付工程と、

前記投影光学系の波面収差を計測する波面収差計測工程と、

前記波面収差計測工程で計測された前記波面収差を所定の関数に対応させ、該関数を成分分解して波面収差の各成分を算出する波面収差成分算出工程と、

前記波面収差成分算出工程で得られた波面収差の各成分に応じて前記外部調整機構により前記投影光学系の性能を微調整する微調工程と

を有する投影光学系の製造方法。

29. 請求の範囲第28項に記載の製造方法において、

前記外部調整機構が、前記特定の光学部材の1つ又は複数の調整して少なくとも3つ以上の収差を独立に調整する投影光学系の製造方法。

30. 請求の範囲第28項に記載の製造方法において、

前記外部調整機構による調整量と前記投影光学系の性能の変化量との相関を求める工程をさらに有する投影光学系の製造方法。

3 1. 請求の範囲第 2 8 項に記載の製造方法において、

前記微調工程が、前記光学部材の姿勢を調整する補助工程と、前記複数の光学部材のうちの前記第 1 面及び／又は前記第 2 面近傍の光学部材の交換を行う補助工程との少なくとも何れか一方を行う投影光学系の製造方法。

3 2. 請求の範囲第 1 項乃至第 3 1 項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系を準備する工程と、

前記投影光学系の前記第 1 面にマスクを位置決めするためのマスクステージを準備する工程と、

前記投影光学系の前記第 2 面に基板を位置決めするための基板ステージを準備する工程と

を有する露光装置の製造方法。

3 3. 請求の範囲第 1 項乃至第 3 1 項の何れか一項に記載された製造方法によって製造された投影光学系。

3 4. 請求の範囲第 1 項乃至第 3 1 項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系を備え、

前記第 1 面に位置決めされたマスクのパターン像を、前記投影光学系を介して前記第 2 面に位置決めされた基板へ転写する露光装置。

3 5. 請求の範囲第 3 4 項に記載の露光装置を用いて前記マスクのパターンを前記基板上に露光する露光工程と、

前記露光工程により露光された前記基板を現像する現像工程と

を含むマイクロデバイスの製造方法。

3 6. 請求の範囲第 1 項乃至第 3 1 項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法によって製造された投影光学系を用いて、前記第 1 面に位置決めされたマスクのパターン像を、前記投影光学系を介して前記第 2 面に位置決めされた基板へ転写する露光方法。



図 2 A

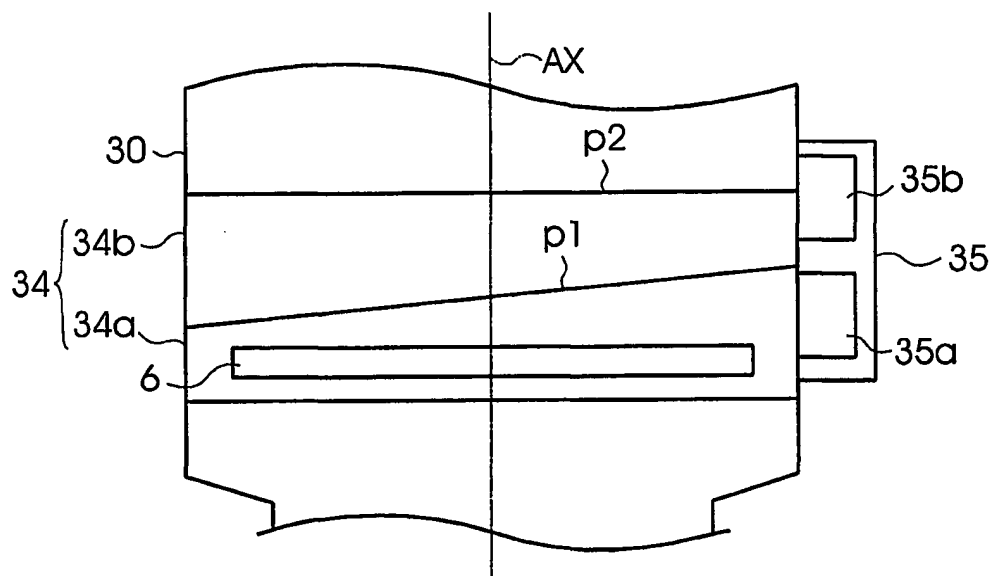
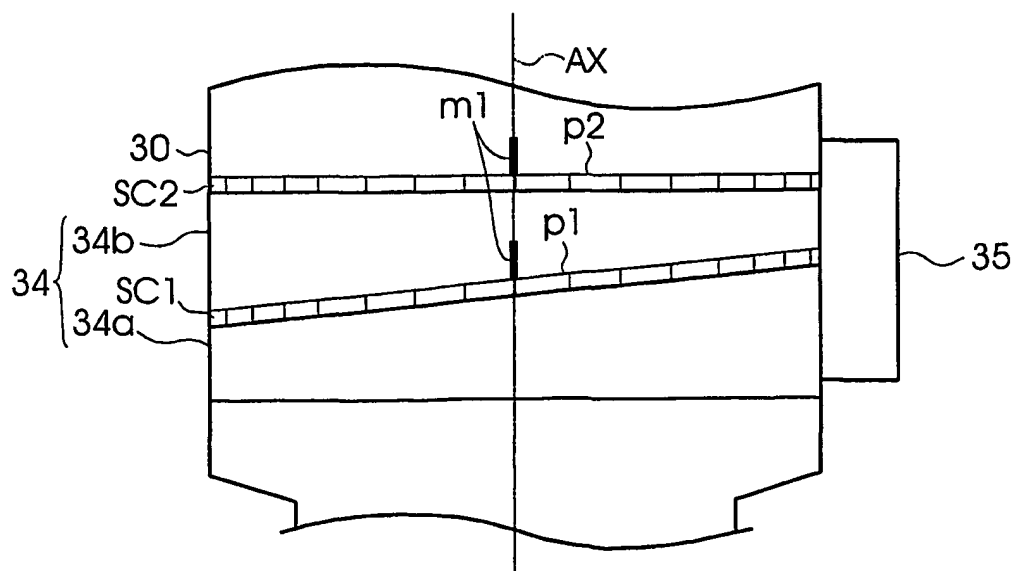
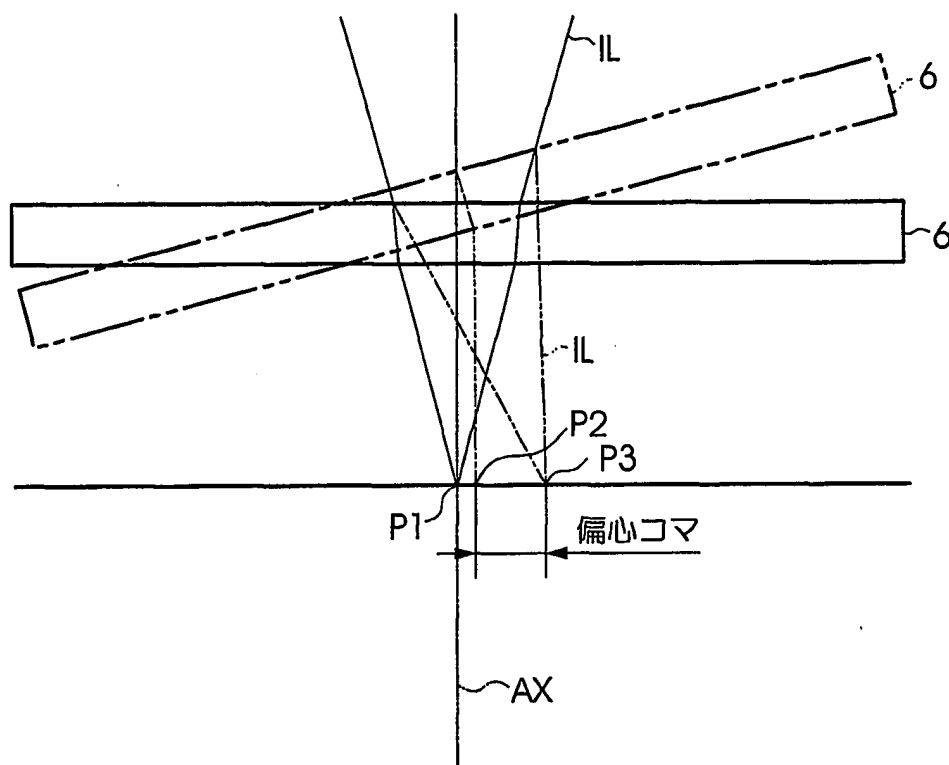


図 2 B



3/21

図 3



4/21

图 4

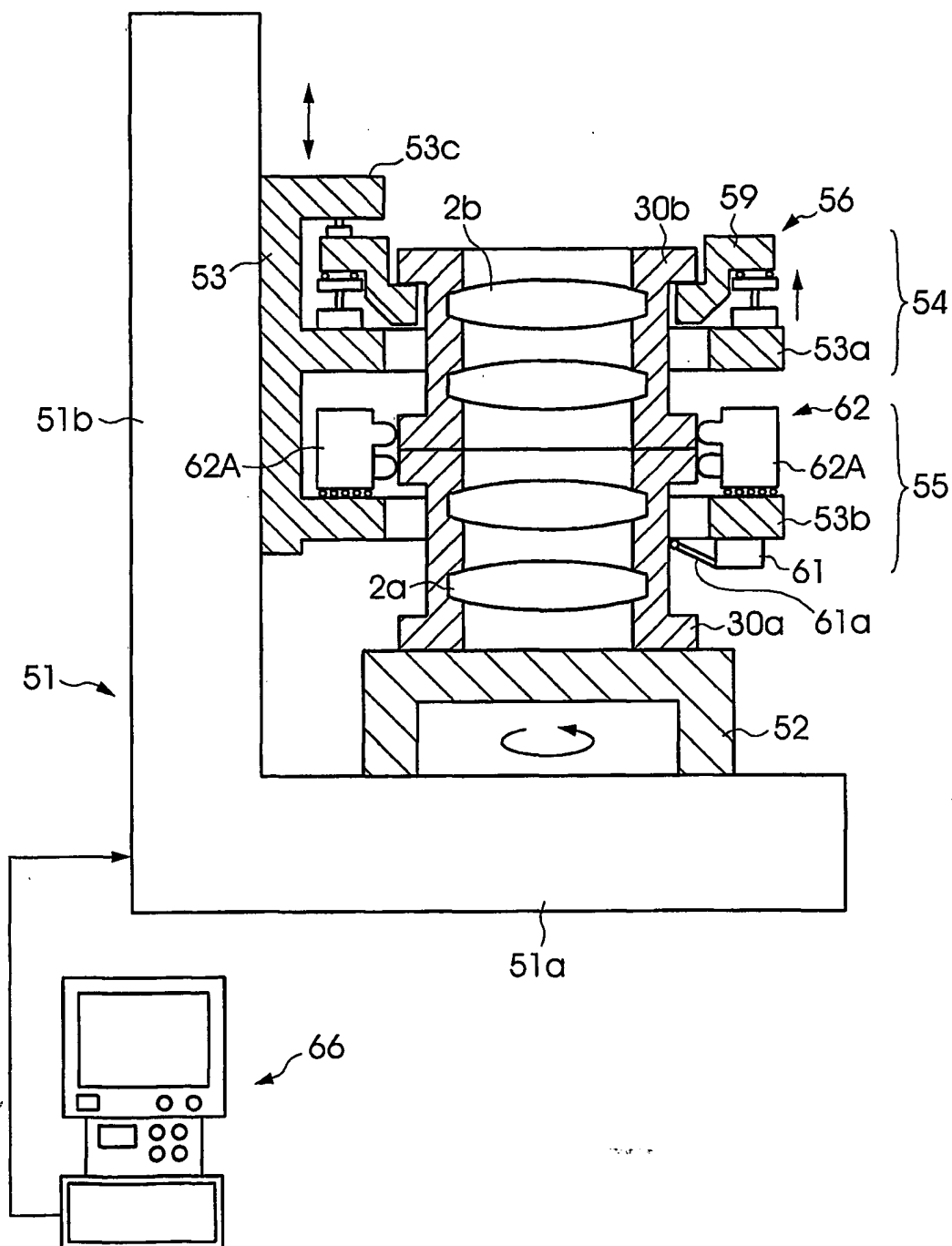
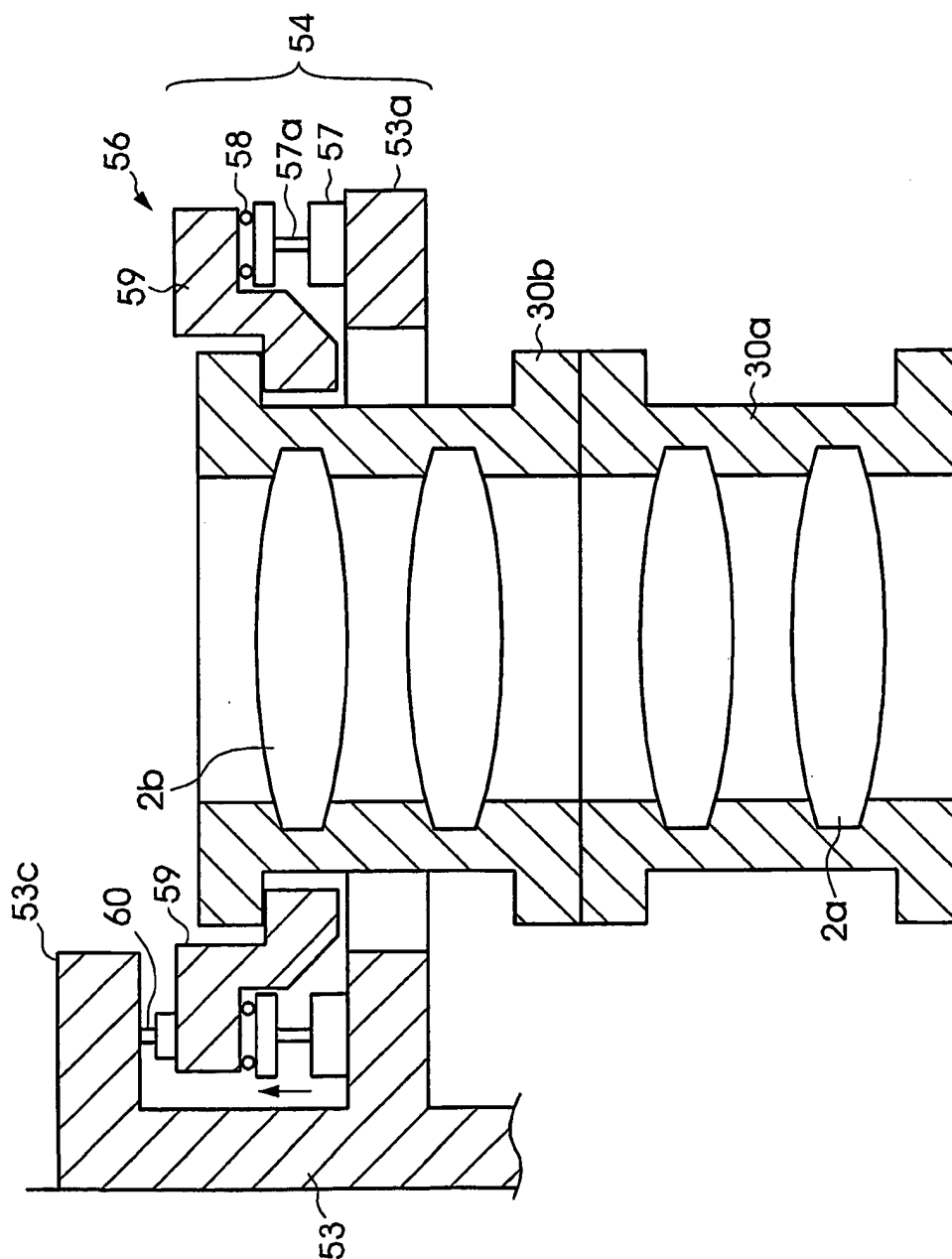


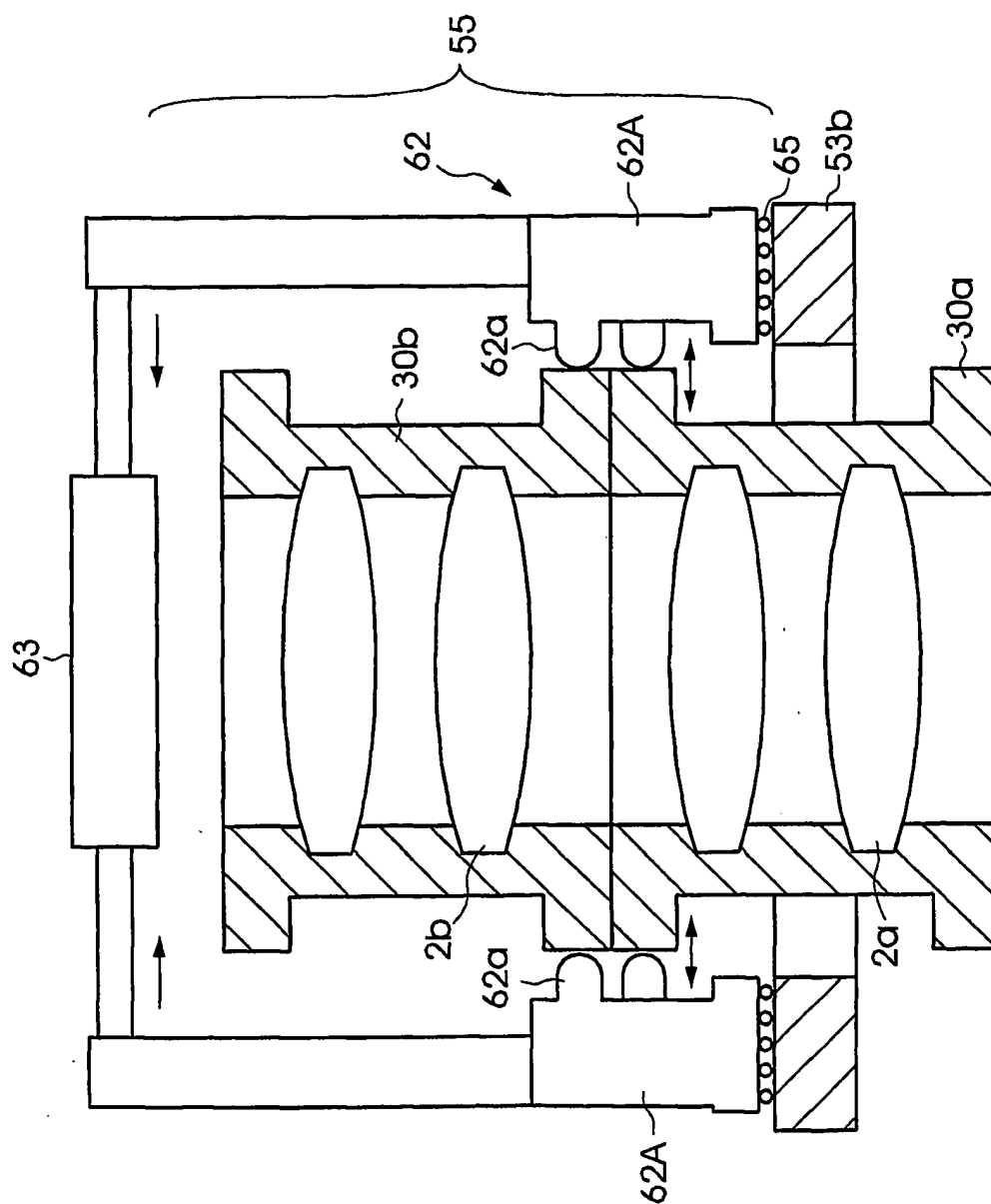


図 5



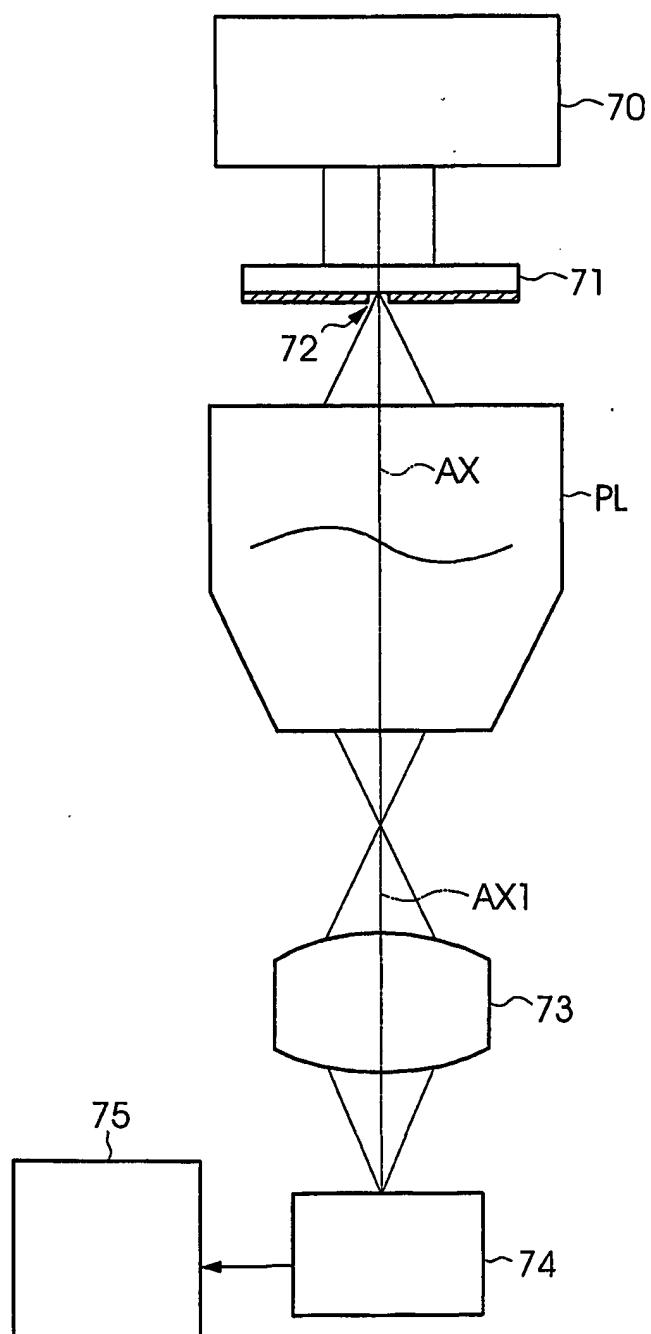
6/21

図 6



7/21

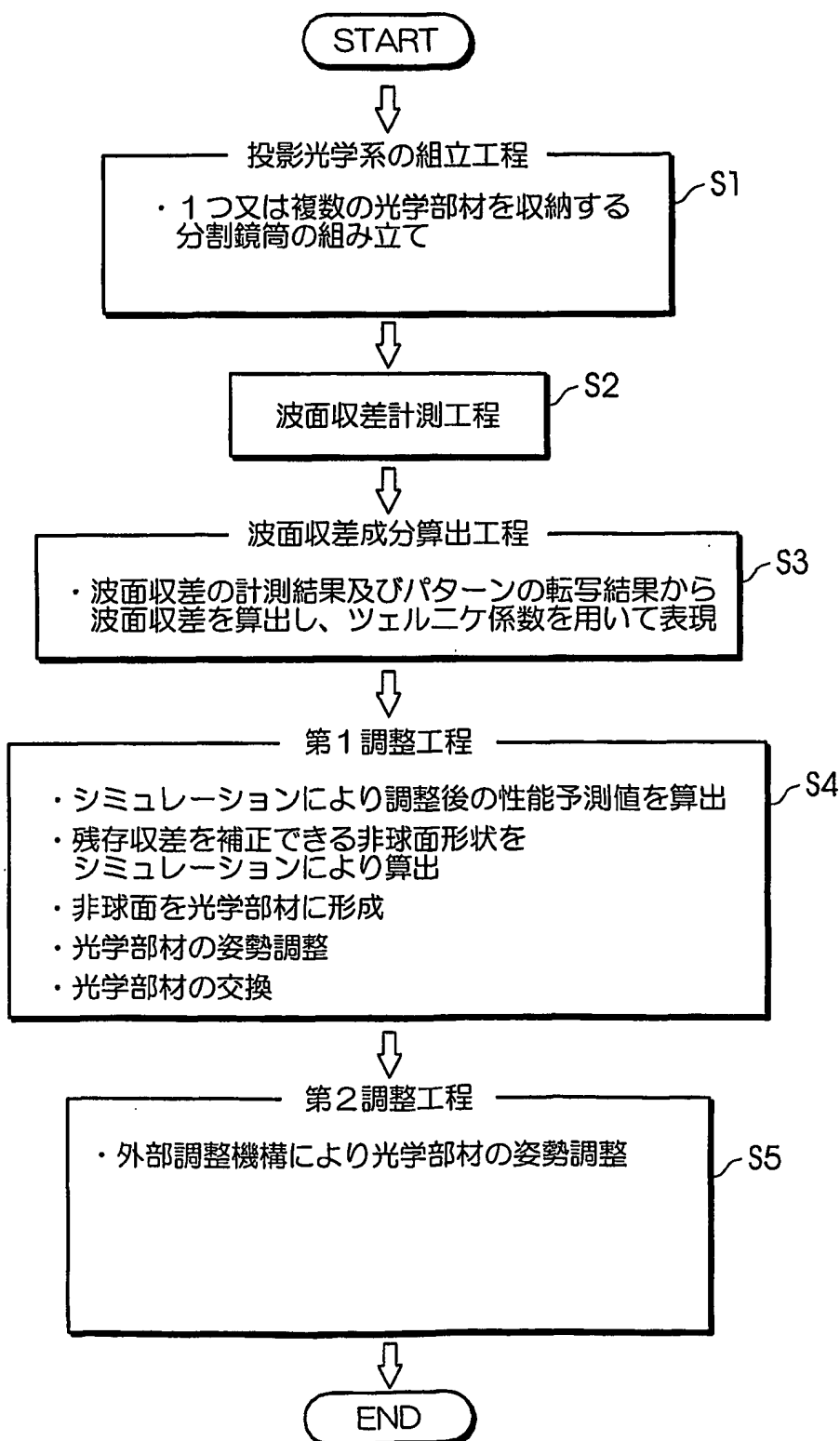
図 7





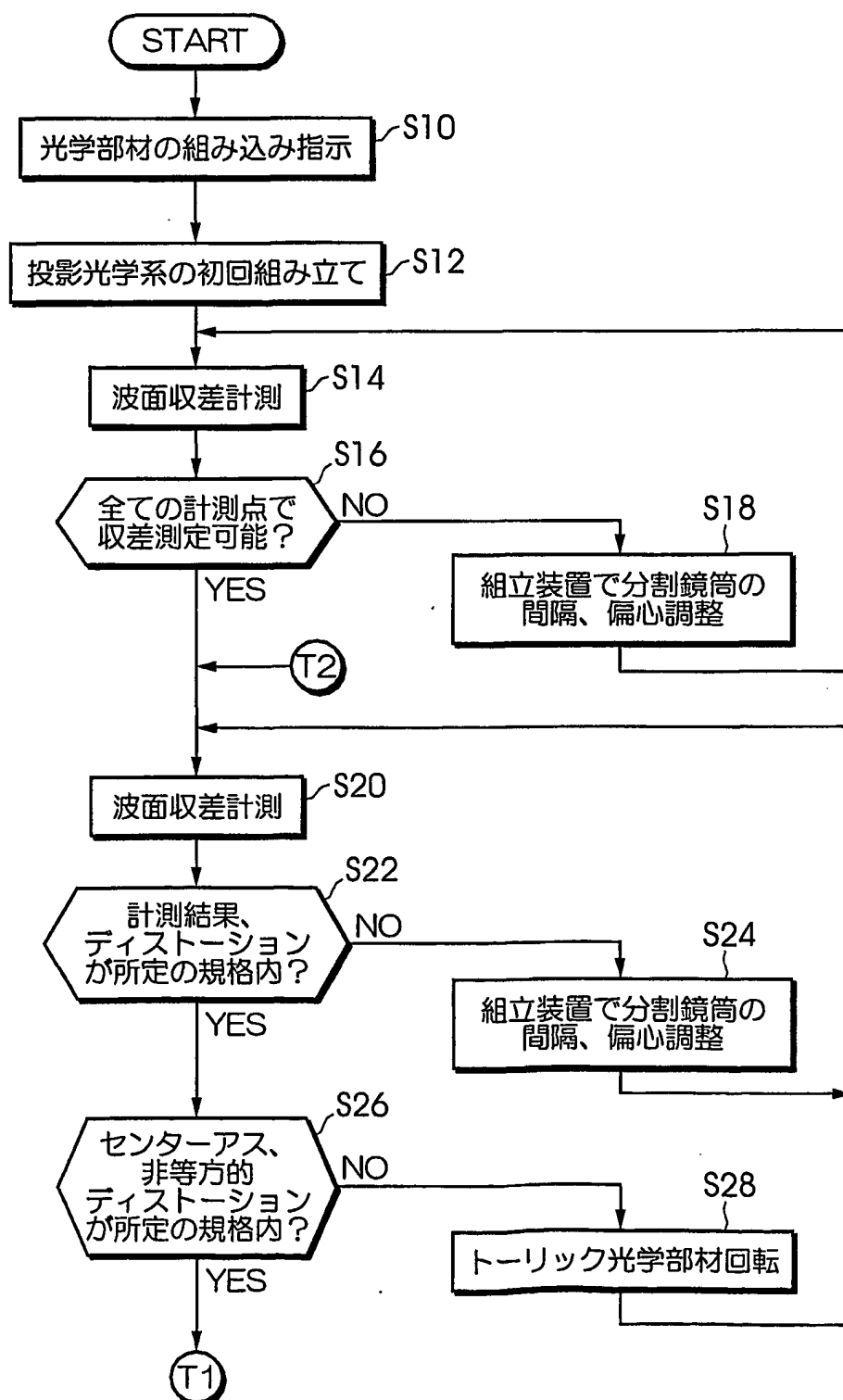
9/21

図 9



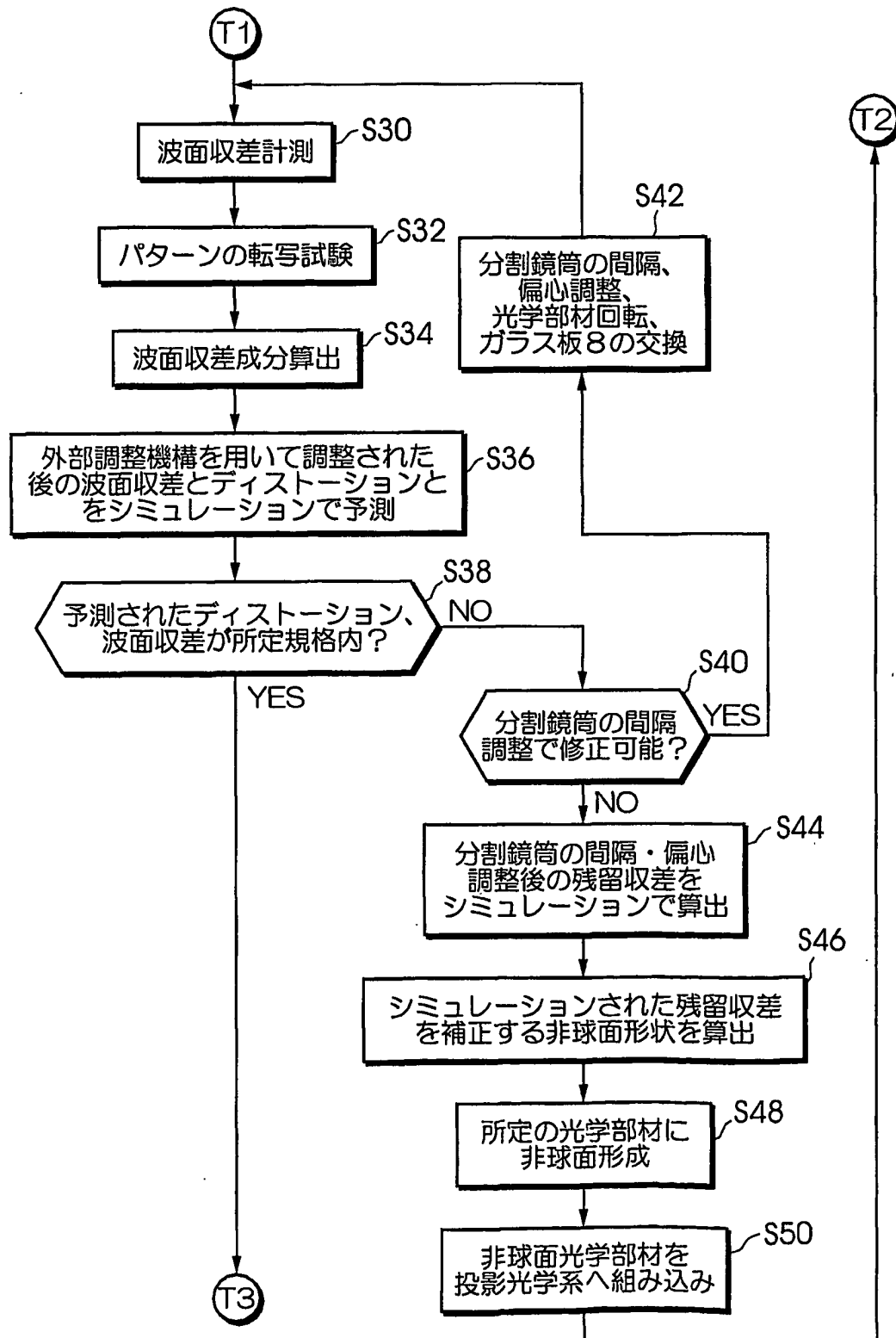
10/21

図 10



11/21

図 1 1



12/21

図 1 2

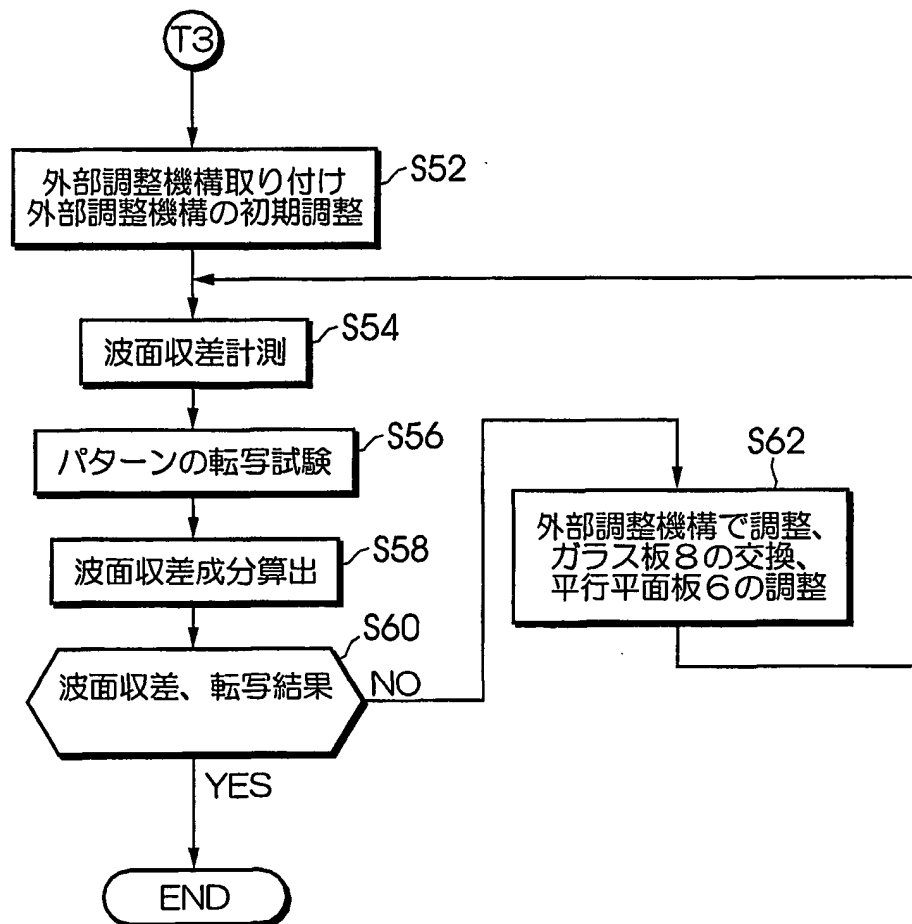




図 13 A

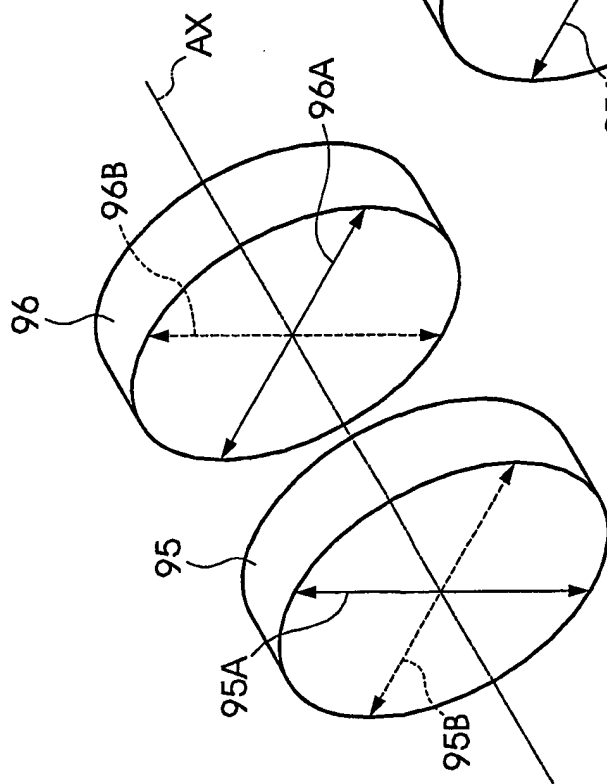


図 13 B

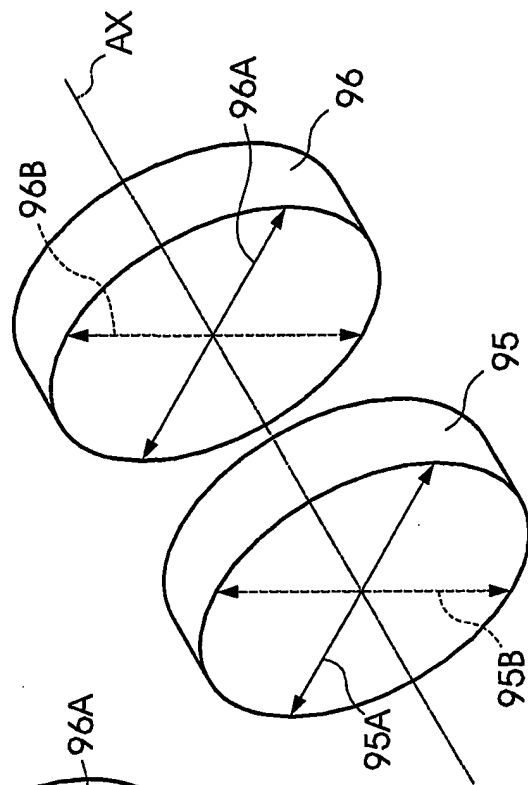
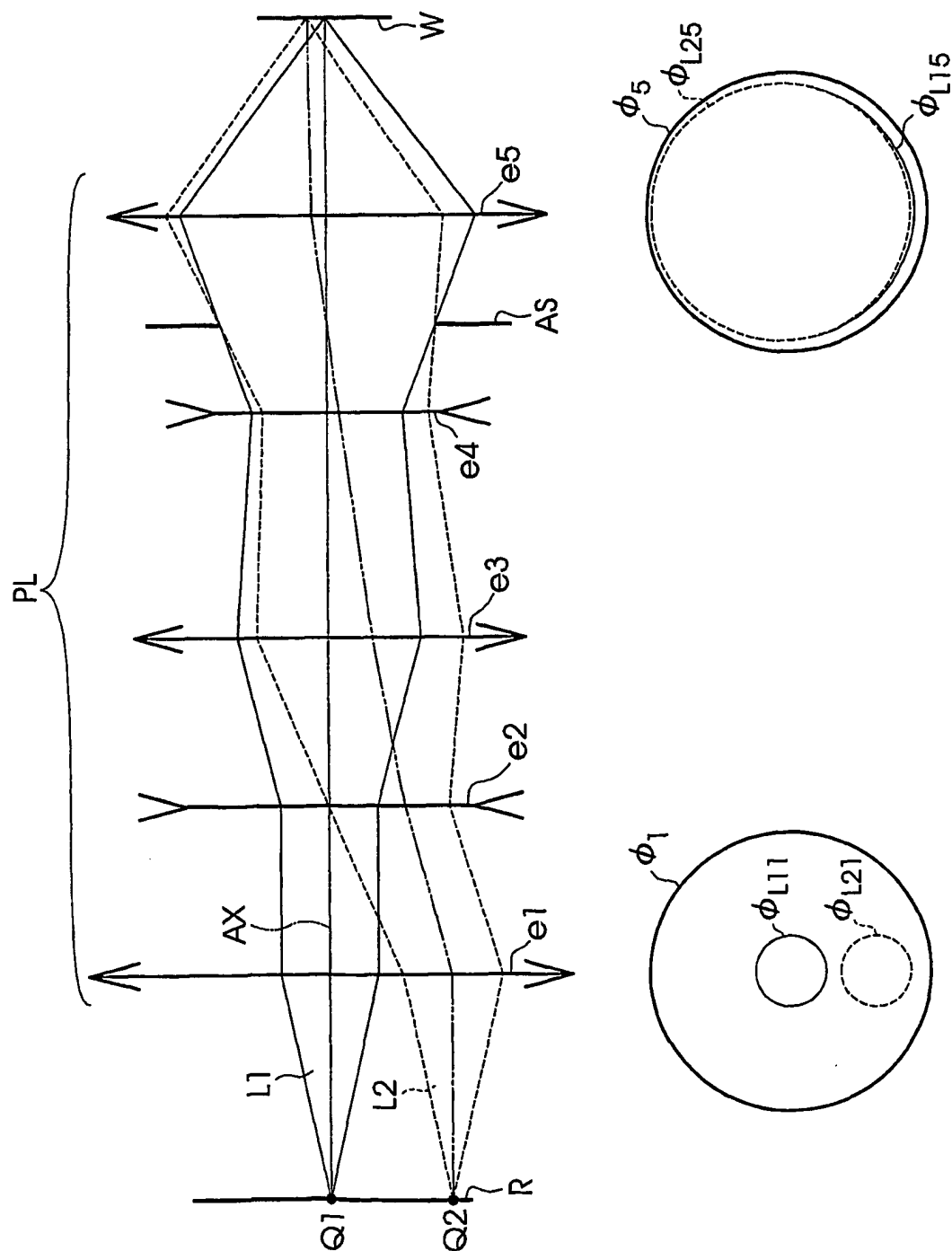
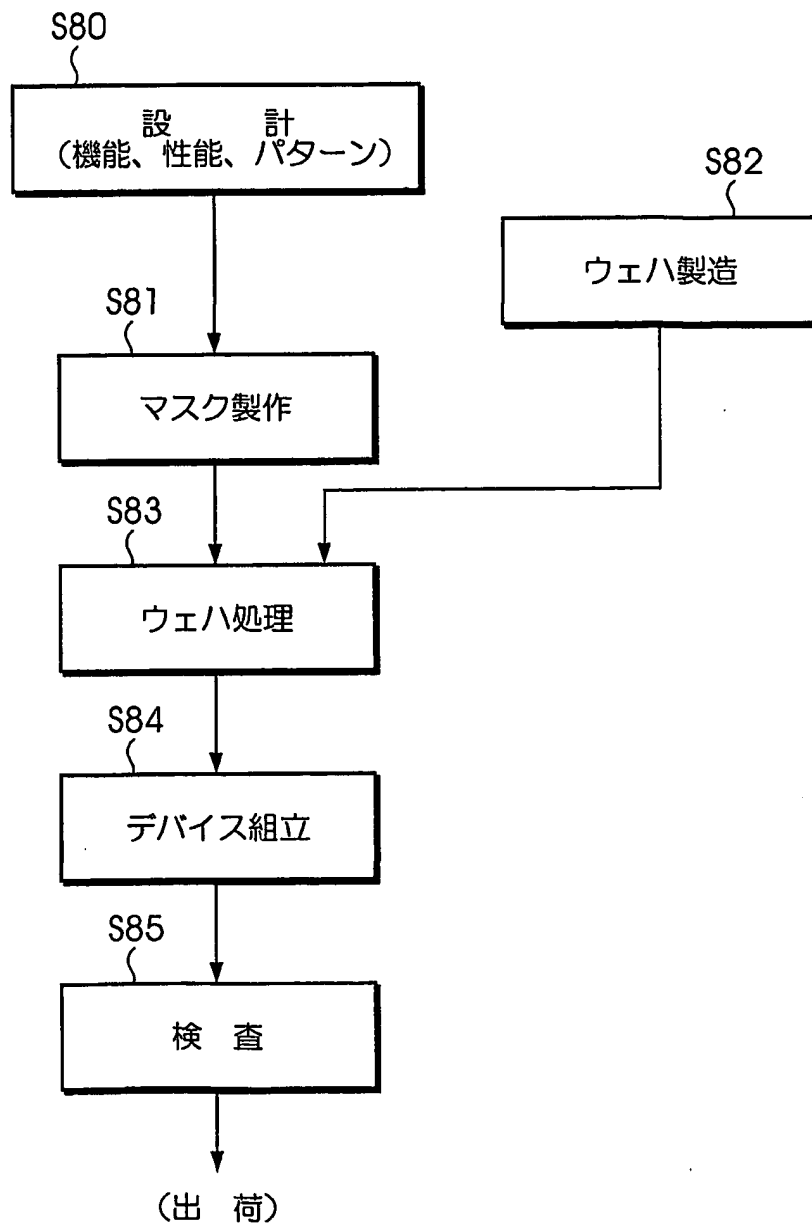


図 1 4



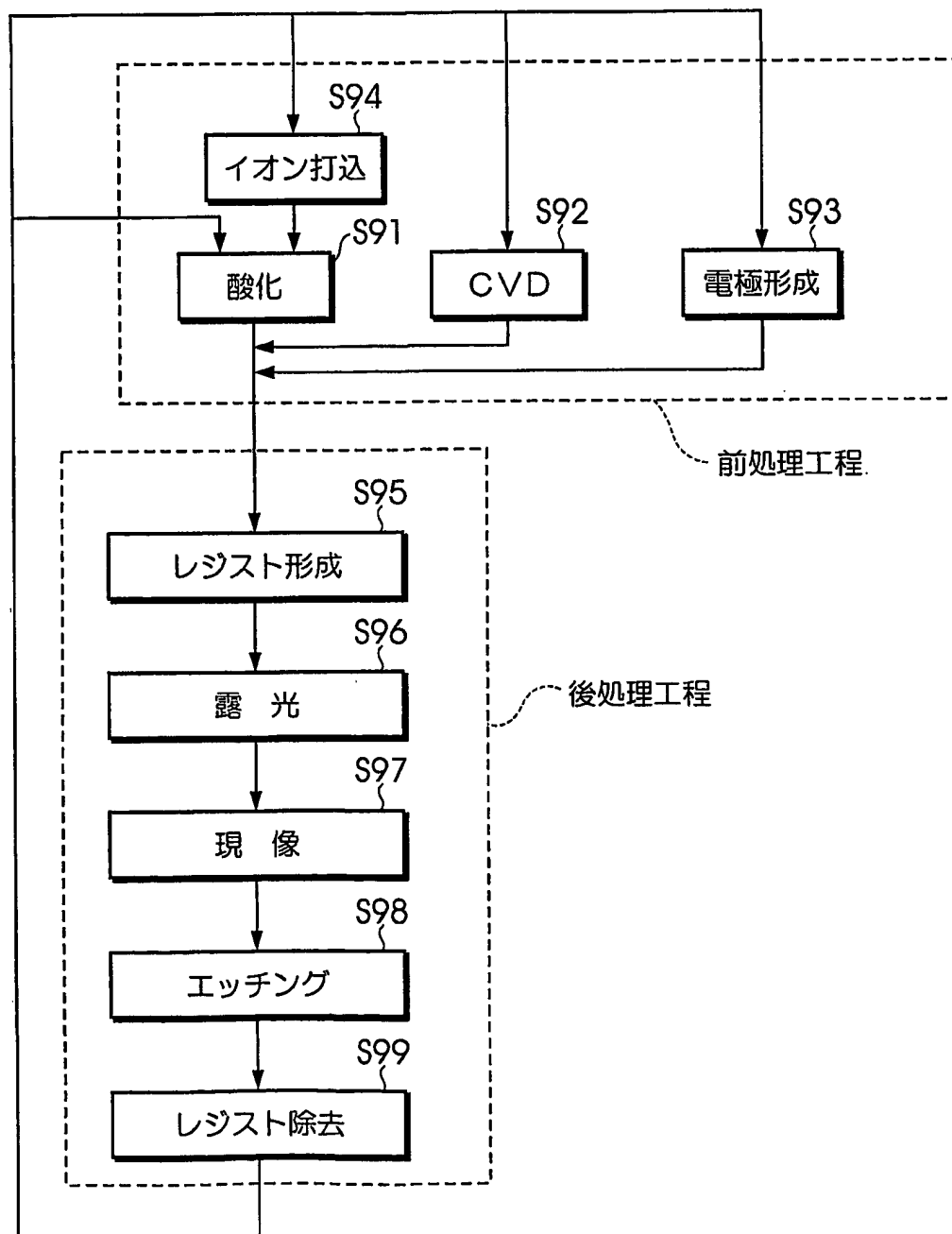
15/21

図 1 5



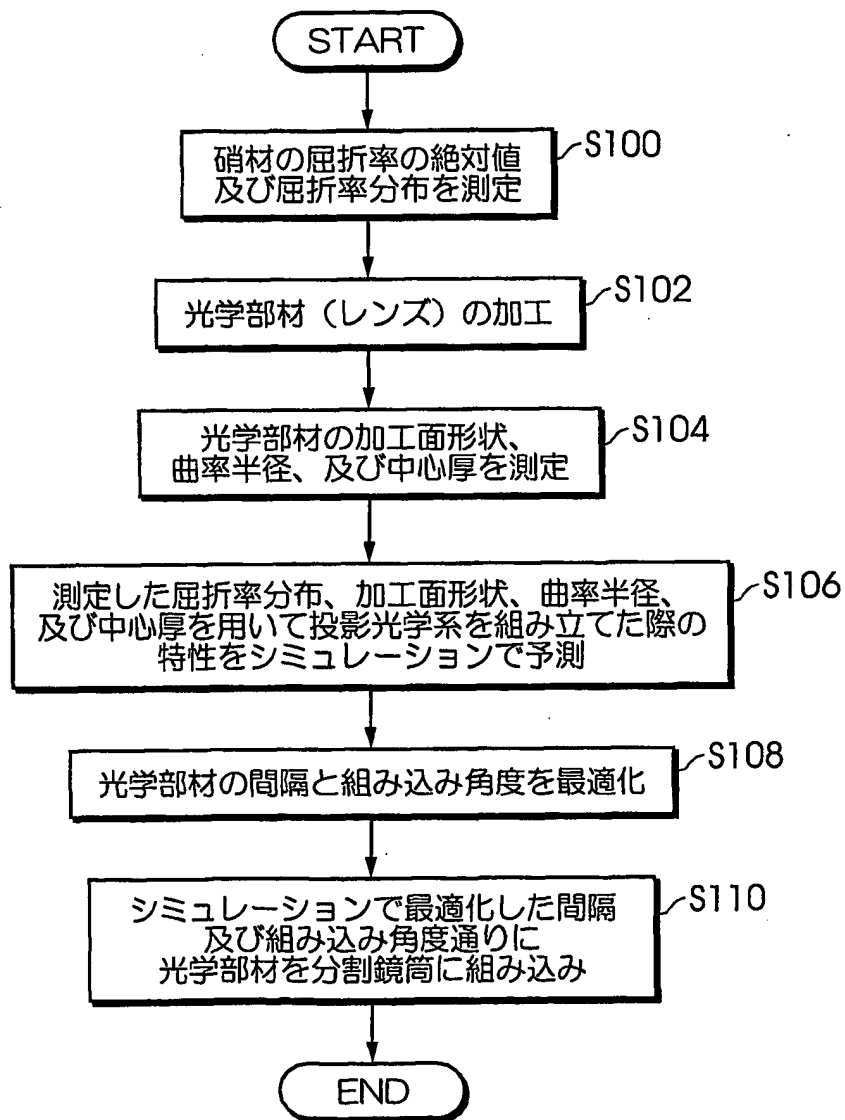
16/21

図 1 6



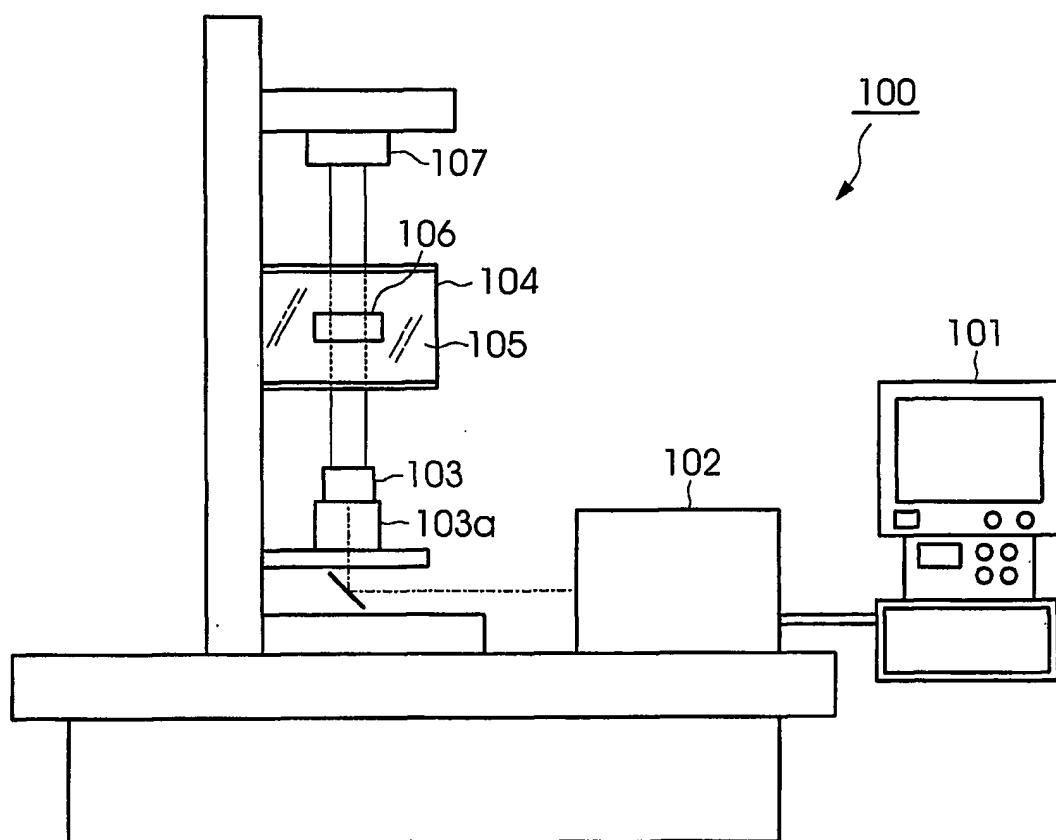
17/21

## 図 17



18/21

図 1 8



19/21

図 1 9 A

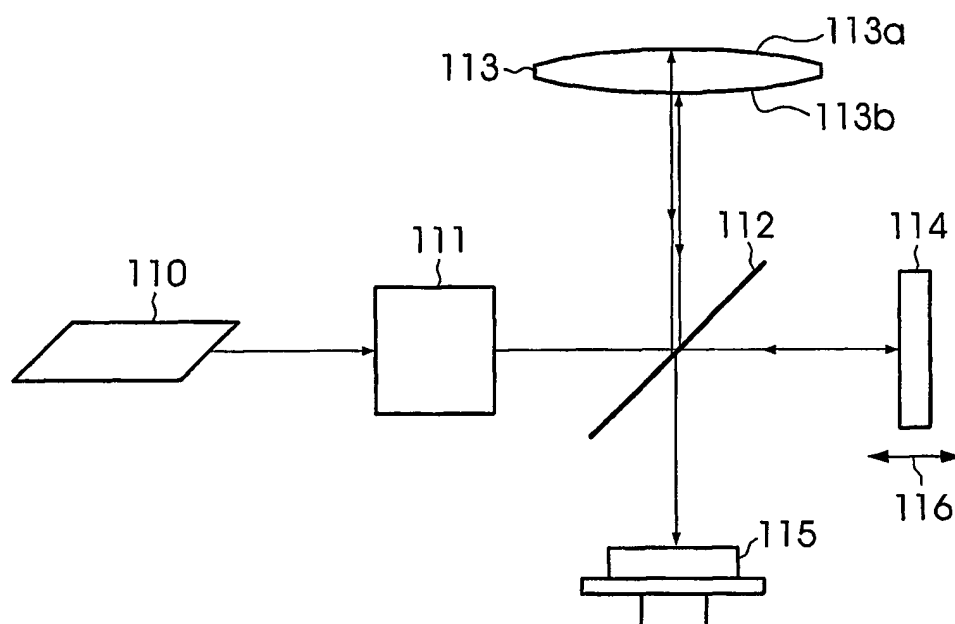
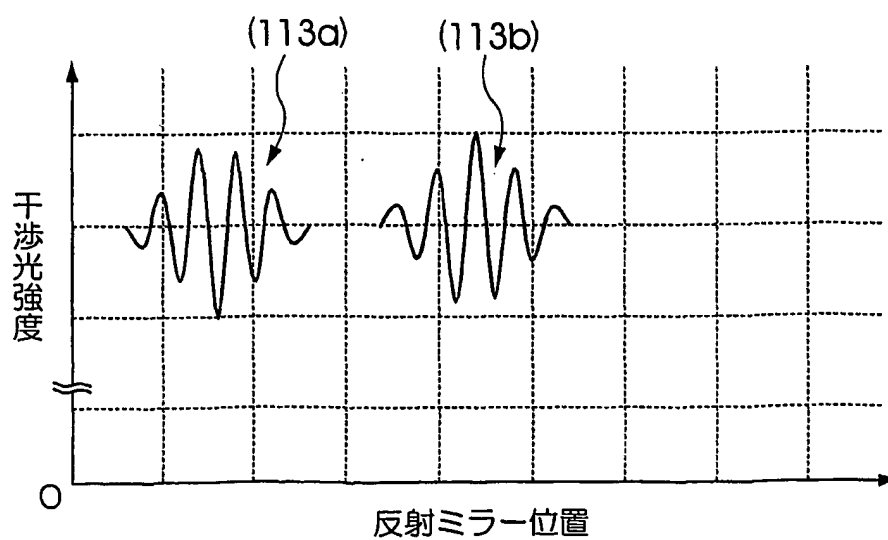
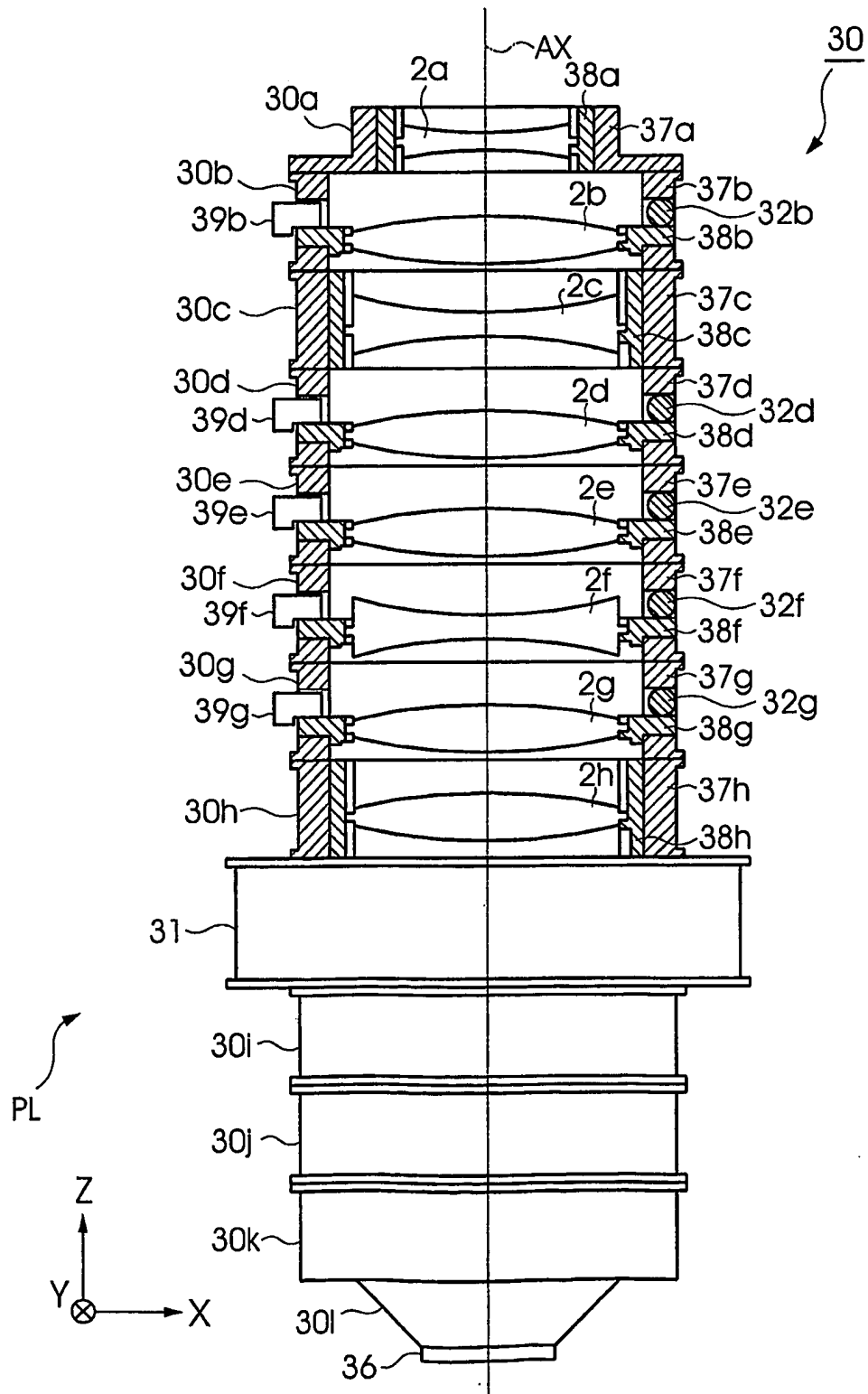


図 1 9 B



20/21

图 20





21/21

図 2 1

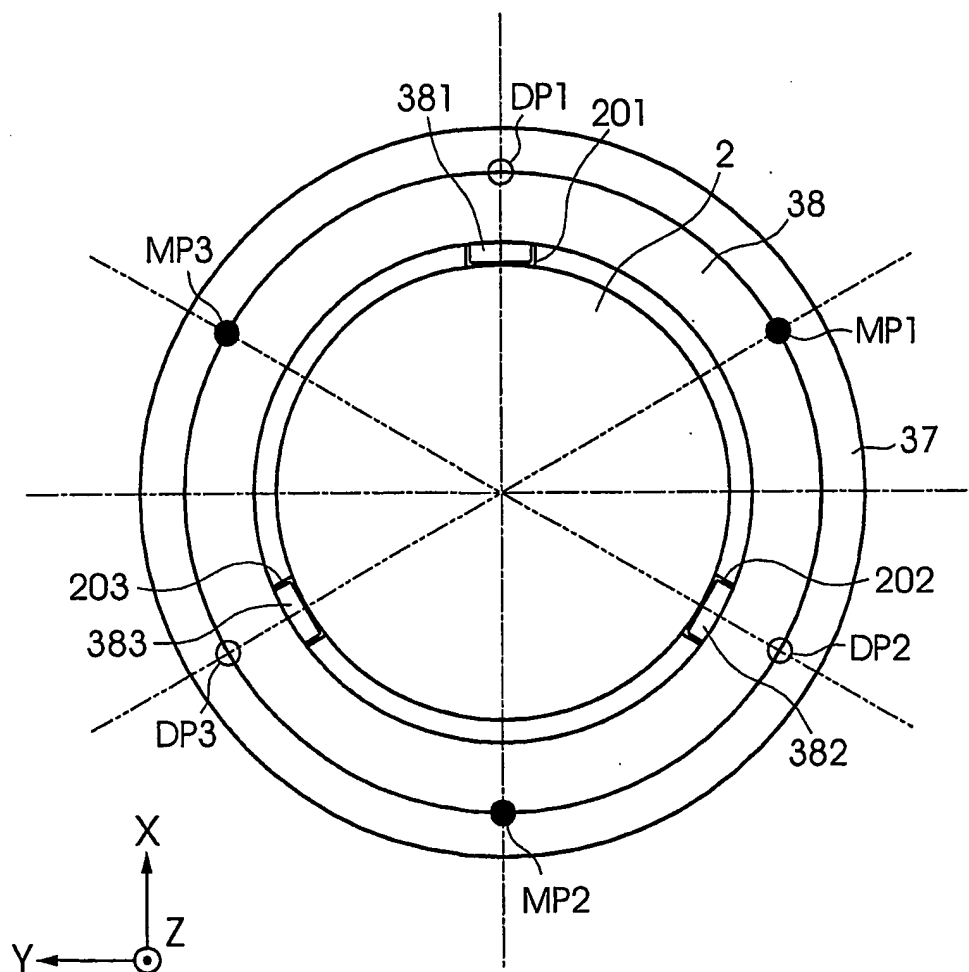


図 2 2 A

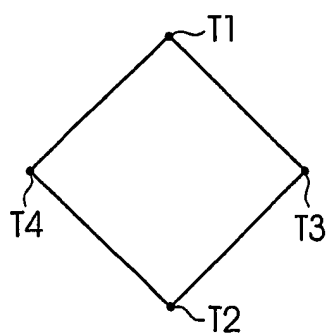


図 2 2 B

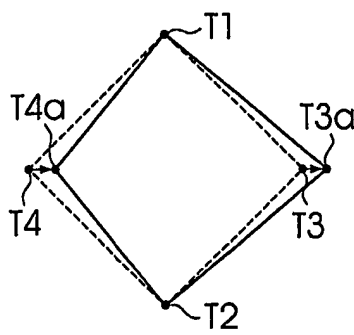
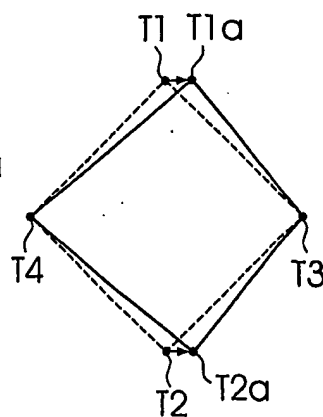


図 2 2 C



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP01/11363

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.<sup>7</sup> H01L21/027, G03F7/20, G02B13/24, G02B13/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.<sup>7</sup> H01L21/027, G03F7/20, G02B13/24, G02B13/18

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2002

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2002 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2000-249917 A (Nikon Corporation), 14 September, 2000 (14.09.2000), Full text; all drawings (Family: none)	1-36
Y	JP 2000-121491 A (Nikon Corporation), 28 April, 2000 (28.04.2000), Full text; all drawings (Family: none)	1-36
Y	JP 2000-47103 A (Nikon Corporation), 18 February, 2000 (18.02.2000), Full text; all drawings (Family: none)	1-36
Y	JP 10-154657 A (Nikon Corporation), 09 June, 1998 (09.06.1998), Full text; all drawings (Family: none)	1-36

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
14 February, 2002 (14.02.02)Date of mailing of the international search report  
26 February, 2002 (26.02.02)Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. H01L21/027, G03F7/20, G02B13/24, G02B13/18

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. H01L21/027, G03F7/20, G02B13/24, G02B13/18

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

## 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2000-249917 A (株式会社ニコン) 2000.09.14, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-36
Y	JP 2000-121491 A (株式会社ニコン) 2000.04.28, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-36
Y	JP 2000-47103 A (株式会社ニコン) 2000.02.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-36

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

## の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

14.02.02

国際調査報告の発送日

26.02.02

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)  
 郵便番号 100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

新井 重雄

2M

8605

電話番号 03-3581-1101 内線 3274